

消 波 構 造 論

1. 消 波 構 造 物

1-1. 定 義

消波構造物とは何を指すのであるか。字義によれば波を消す作用をする構造物ということになる。それでは消波の定義はどういうことであろうか。英語では wave absorbing, destruction of wave energy などという語を当てている。これらの語を見てもここで問題として取り上げている消波とはなんらかの人為的な方法によって波のエネルギーの一部あるいは大部分を吸収または破壊することにより、ある構造物に対する入射波の透過率、反射率および波力を減殺することと定義してよいであろう。したがって消波構造物とは、この人為的に波のエネルギーを吸収あるいは減殺するために、防波堤、海岸堤防、護岸などに附帯して作られる特殊な構造物ということになる。

たとえば消波用異型ブロックまたは簡単に消波ブロックという語が現在わが国では広く用いられているが、これなどは最も端的に名称がその目的を表わしている代表的な例といえることができる。しかしその他に消波構造という名称をもったものがあるかといえば、確かに本来この言葉が意味するような働きをしているものでありながら、特に消波と呼ばれるものがほとんど見当たらない。比較的古くからあるわずかの例外として“消波浜”という語を思い出す程度である。

多くの港湾に欠くことのできない施設である防波堤も見方によっては代表的な消波構造物といえる。その理由は防波堤はそれによって被覆、保護された港内の泊地を外海と遮断して、外海の荒波を遮り、港内を波のない静穏で安全な碇泊の場とするためのものであるから、間違いなく消波という役目を果している。しかしわれわれは前述の消波ブロックとか消波浜のことを考えた場合の消波という語のもつイメージとは別のものを最初から防波堤に対しては抱いている。それはこの構造物が防波堤だからであって、消波と防波とは異なるものを指しているのである。

この点については消波という語の意味を広義、狭義両様に解釈することによって説明できるように思う。すなわち防波堤が外海の波を遮断して、それが取り囲んでいる港内を静穏にするというような場合には、防波堤それ自体が波にどのように対応するかということは一応別の種類の問題であって、ともかく防波堤の位置において、港内に進入しようとする波のエネルギーをいかなる形においても遮断できればよいのである。この場合には防波堤によって外海の波はほとんど大部分が遮断され、防波堤開口部を通過した外海の波のエネルギーの一部分による波が残るだけであるから、港内の波は外海に較べて遙かに小さくなり、外海の波が消波されたということになる。したがって防波堤は消波構造物であるといえることができる。防波堤が消波構造物であるというのはこのように広い意味に解釈した場合のことであって、それ自体が必ずしも波のエネルギーを吸収するような構造物であるとは限らない。すなわち防波堤は波を遮断することによって港内を静穏にする構造物であり、広い意味からいって消波の役目を果すものである。

1-2. 消波構造物の目的

以上の解釈に対して、構造物それ自体が空隙、粗度、その他特殊の機構を備えていて波のエネルギーを吸収あるいは破壊するように設計された構造物のことを狭義の消波構造と呼ぶことにする。この種の構造物は上記の防波堤と同様に、それによって被覆された水域内の静穏を図る場合にももちろん用いられるが、主たる目的はむしろ構造物それ自体で波のエネルギーを吸収することによって、波の反射を減少し、跳波を押え、

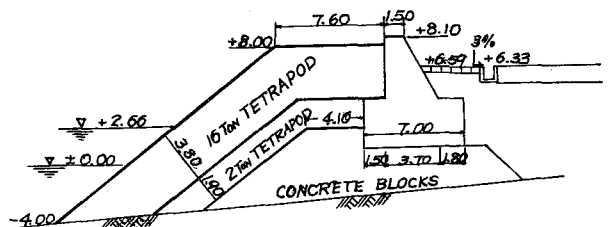


図-1 由比海岸堤防前面の消波堤(岩垣、土塁、井上)¹⁾による

さらに碎波による強大な波力を減ずるという点にある。

1-3. 消波構造開発の現状

以上に述べたような目的に向かって消波構造に関する種々多数の考案や研究が行なわれているのであるが、今日までの段階で実用化し大規模に用いられている消波構造としては、例えば由比海岸堤防²⁾ (図-1)、あるいは大分臨海工業地帯1号地前面護岸²⁾ (図-2) の例に見るように海岸堤防または護岸の前面に異形コンクリートブロック (消波ブロック) を用いて消波堤を構成する場合がその1例である。また留萌港南防波堤は最初は低基の混成堤であったが碎波による強大な波力と激しい越波を防ぐため、図-3のような断面に改修された。この場合は、直立部前面に堤体の一部としてテトラポッドによる消波構造を用いた例である。

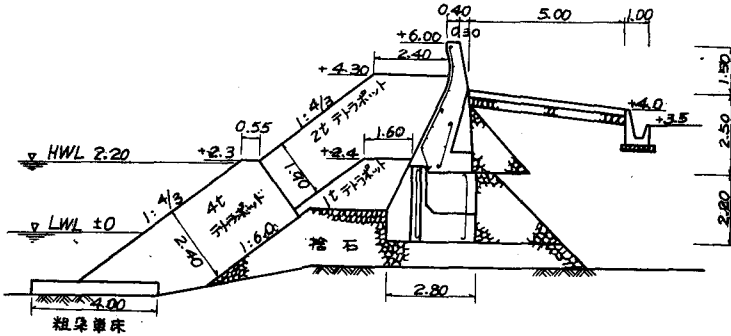


図-2 大分臨海工業地帯1号地前面護岸 (辰巳²⁾による)

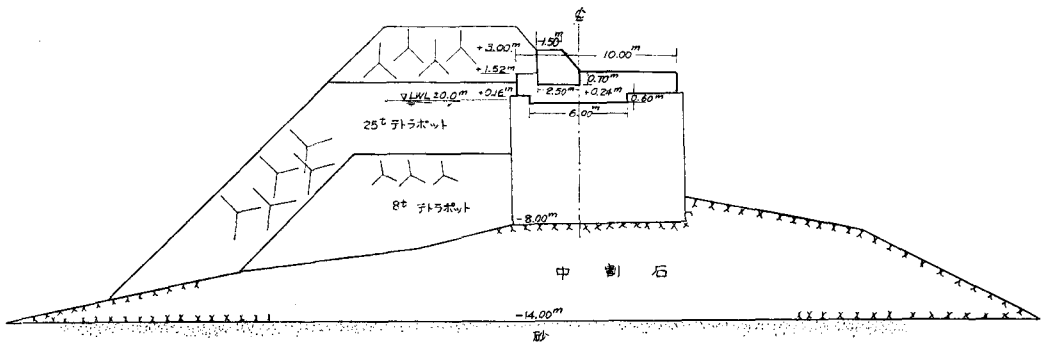


図-3 留萌港南防波堤箇上標準断面図
碎波堤部

なおこれはわが国における実例の一部であるが、この他に狭義の消波構造と呼ぶことができる多数の考案が発表されている。それらの主なものをあげると、原理的には摩擦損失によるエネルギー減殺を利用するもの、空気を有する構造物を用いて、空げき内に圧入され複雑な通路を通る水流の水頭損失を利用するもの、空気および流体防波堤³⁾、浮防波堤^{4),5)} によるもの、共鳴式消波岸壁^{6),7)} (resonant basin)、特殊構造を有する直立壁⁸⁾、群杭式防波堤^{9),10)} など枚挙にいとまがないほどである。しかしこの中の多くのものはまだ実用化に対する試験の途上にあり今後可能性を残しているものといえる。

このような消波構造物と称されるものが出現したのは1950年頃からである。その中のあるものはそれ以前に第二次世界大戦中の軍事上の必要から着想されたものが次第に発展したのであって実験室および試験工事などによって実験的な研究を行ない資料を集積したという程度のものが多い。したがって消波の機構などに関する本格的な考察は今後に残されている問題である。それ故、この小文においても表題は物々しいが、消波構造の定義を一応定め、その機能を構造別および目的別に解説する程度に止まらざるを得なかった。

消波構造に関する設計法といい得るようなものが現在あるかどうかについてもいろいろ考え方があると思うが、

もしあるとしても現状では模型実験より得られた諸種のデータを処理する方法に止まるのではなからうか。したがって消波効果の相似率に関しても今後問題が残っており、多方面からの地道な研究が望まれるのである。

2. 消波構造研究開発の必要性

2-1. 概 説

わが国で消波構造という名称がしばしば聞かれるようになったのは1950年頃からのことであって、それ以前には港湾工学の参考書などにも特に人工的な手段による消波構造という語は見当たらないようである。現在、消波構造の代表的な1型式である護岸または海岸堤防前面の消波堤、あるいは捨石防波堤の表面被覆に用いられる各種の異形コンクリートブロックは、その元祖ともいべきテトラポッドについて見ても本来は捨石防波堤の表面被覆粗石の代りに用いられるべく、その安定性を使命として誕生したものであった^{11),12),13)}。このブロックによって作られた構造体の有する空けきの作用による消波の機能は附帯的な効果であったのが、現在ではその消波効果を主目的とした使用法も考えられるに至っている。

このように消波ということが特に近年に至って多くの関心を集めるようになったのは、実際問題として消波を特に必要とする種々の事態が港湾施設、海岸施設において発生してきたことによる。この現象は独りわが国においてばかりではなく、外海に直面した港を持つ国々では、それを必要とする目的は多少異なるにしても、同様な事態に対処する必要に迫られているという例が各地に見られる。

港湾、海岸構造物に対する波の作用には昔も今も特に変わりはないはずであるのに何故近年になって特に消波および消波構造という問題が注目を浴びるに至ったのであろう。

先ず最初に最も根本的な理由というか、事の起こりについて要約すると、港湾に関しては港内の利用価値が次第に高くなり、往時のような余裕のある用い方ではなく、水際線でも泊地でも最高度に効率をあげて利用しようとする傾向になってきた。これを、このような傾向に対応する港湾施設の側から見ると、港の構造が次第に精密化の方向へ移りつつあるということになる。そのため外海に面している多くの港湾においては、防波堤の開口部より侵入する外海からの波によって種々の不都合な現象が発生し、消波という問題に立ち向う必要が生じてきた。またわが国においては海岸地域に各種産業の施設が集まり、したがって入口も集中し海岸線が最高度に利用されるようになった結果、海岸の防護が非常に重要な問題となってきた。海岸堤防、護岸を経済的にしかも最上の効果を期待しうるように建設するためには消波工というものを研究する必要が生じてきた。概略このような理由によると考えられるが、消波構造物を研究し開発することの必要性をその目的の上から分類して述べてみる。

2-2. 必要性に関する実例

(i) 港 湾 の 場 合

広い外海に面しているふつうの港においては、静穏で安全な泊地、繫船設備を維持するために防波堤を必要とする。防波堤の目的は港内の泊地に外海の波を到達させないことである。それぞれの港の地形上、気象、海象上の諸条件を考慮して防波堤開口部の位置、向き、幅員などが、外海からの侵入波が最小の状態になるように決定されることはいうまでもないが、船舶が安全に航行できるような開口部がある限りは必ず波が港内に侵入する。港口から入射した波は回折によって港口から扇形上に拡がり、さらにその進路の途上に直立壁があれば反射されて方向を変えることにより港内の隅々まで進んでいく。港を計画するに当たっては、このような港内に侵入する波のことを考慮して波の進路にあたる港内の一部に消波浜 (spending beach) を設けて波のエネルギーを吸収するとか、港内利用上に支障のない浅い水深部分を残しておくようにするとか、あるいは、波の進路上にある岸壁においては直立壁の代わりに一部を棧橋構造にするとか、防波堤や導流堤の港内側に粗度をつけて回折波や反射波が堤沿いに走るのを防ぐとか、それぞれの港の状況に応じて種々の工夫をして、港内の波が騒ぐのを防ぐ配慮をすることは古くより港湾技術者の常識であった。直立壁からなる繫船施設により四周を囲まれているドック式の港（特にヨーロッパに多く、大河川の中流に位置する港）は例外として、十数年前頃までは多くの海港では港内の状態が上記の各要素を満しているのはごく当然のことであって、港内には自然に入射波あるいは、港内に発生した波（特に長周期波を除く）を吸収できる余地が残っていて、設計者は特に消波ということを考えずに計画をたててもこれらの要求を満足させることができたのであった。

しかし近年になってそうした一般的事情にかなりの変化が生じてきたのである。数多くの大港湾においては、幅狭する船舶に対処するため、バースの増設を要求される。限られた港内の水際線および水面をできるだけ有効に利用するためには、前記のような消波の効果を持つ水域は次第に影をひそめ港内の周囲はすべて直立壁でかこまれるようになる。あるいはまた突堤式埠頭を平行に並べることによって三方を直立壁で囲まれた細長い矩形の水面がいくつもあるようになる。このような水面においては港口より侵入した波のエネルギーは直立壁で反射されることによって容易に減衰せず、条件によっては何回も反射を繰り返して遮蔽域内に複雑な波を生じたり^{14), 18)}、またはスリップ内に副振動を発生したりする¹⁵⁾。その結果荷役その他船舶関係の作業に悪影響を及ぼし、さらに場合によっては岸壁その他の港湾施設に損害を与える^{16), 17), 18)} ような事故の発生を見るに至った。まったく同じことが最近の臨海工業地帯に建設されている工業港¹⁹⁾についてもあてはまる。このような工業港では前記のような古くから開かれていた商港とは異なって、新しく造成された土地に埋立てによって埠頭が作られ、あるいは逆に陸地を掘り込んで泊地を作るのがふつうであるため、港内の水面積はいずれも最小限におさえられ、また周囲はほとんど直立壁であり、泊地の形、配置なども複雑で波の反射に好都合な形を持つような場合が多い。またこれとは対称的に漁港や地方の小港湾においては、港内の水面が非常に狭いため、その周囲にはほとんど、全部直立の護岸が作られている。また港内面積の割には港口幅が大きいので港内の騒乱に悩まされる結果をきたす。

港口から港内へ侵入してくる波により、その港の形と波の周期との組み合わせによっていろいろ異なった型の港内波が発生する^{15), 16)}。潮汐や津波のような特別の長周期波は一応例外として、いまここで主として問題になるのは通常のうねりによる10~15秒くらいの比較的周期の長い波と、6秒以下程度の風浪の場合である。短周期の波は港内に碇泊している大型船に対してはあまり重大な影響は及ぼさないが、周期が15秒くらいになると泊地の形によっては副振動の発生を来す場合があり、岸壁に接岸している大型船に対しても影響¹⁵⁾が出てくる。またこれらの中間程度の周期の波によっては、これも港の形に関係することであるが、反射によってある場所に波のエネルギーが収れんし、このような場所には強大な波力が働いて思いがけぬ損害を生ずることがある。周期が長くなるほど、反射の際の減衰が小さくなるからである。以上に述べたように消波構造を必要とする理由は数々あるが、次にいくつかの実例を挙げて必要性を検討してみよう。

a) Milwaukee Harbor の例¹⁸⁾

図-4は五大湖の1つであるミシガン湖に面するミルウォーキー港外港部の平面図である。この港においては北

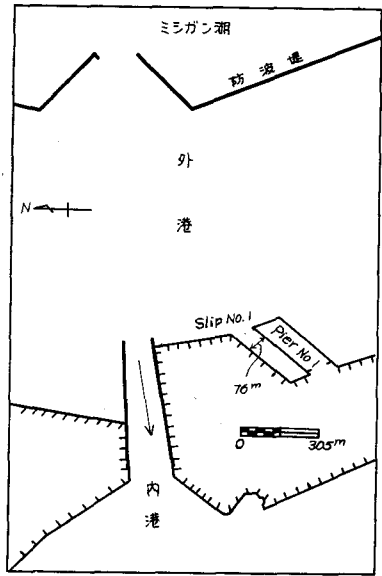


図-4 MILWAUKEE 港 (E.F.Brater¹⁸⁾より)

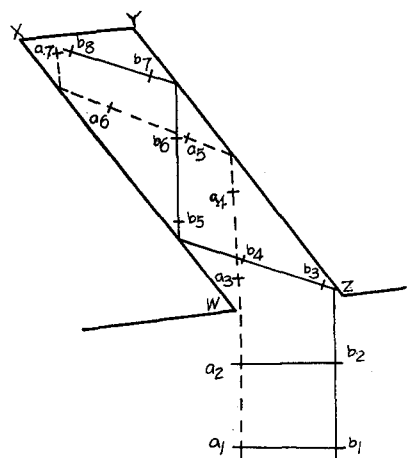


図-5 波の収れん

東の風の時期になると、防波堤の開開口部を通して侵入する波によって外港部に位置する Slip No. 1 の奥の部分に高い波が発生し、その結果、陸上に打ち上げて施設に損害を与えるのであるが、これは図-5によって説明される。現地における実測によると、周期が約5秒の波によって最も悪い状態が出現することがわかった。この現象を模型実験によって研究することになったが、模型においては実物換算で約5.5秒の波が実物と同じ状態を再現した。なお波の陸上への打ち上げは周期4.8~6.5秒程度の波の場合に起こることが判明した。

この港においてはこの困難な問題を Slip No. 1 それ自身の内部だけで解決しなくてはならないという事情があった。すなわち現在の防波堤の外部にさらに防波堤を置くことは経済的に成り立たず、また港内に波除堤を設けることも船舶航行上の観点より無理であった。その上 Slip 内の水面積も可能な限り狭くしたくないという要請もあった。このような場合にはどうしても Slip を取り囲む岸壁の何処かに消波構造を設けて、入射波のエネルギーを吸収する以外には方法がない。

b) Mentor Harbor の例¹⁸⁾

この港も同様に五大湖の1つ Erie 湖に面し Cleveland 市の北東約20哩の所にある。図-6に示すような形の泊地より成る小港であるが、Erie 湖に向かって開いている開口部より侵入する波によって泊地内の各所に不規則な

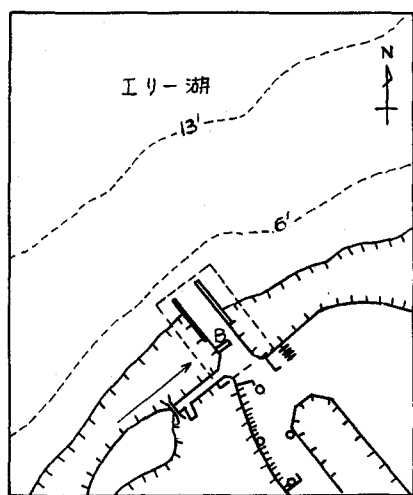


図-6 MENTOR 港 (E.F.Brater¹⁸⁾ より)

波が発生し碇泊している船は船上での作業に困難を来したり、岸壁に着いているのが危険になったりする。港口より入る波を防ぐため航路内のB地点には航路幅を狭くするために沈船を利用した波除堤を設けて約60m幅の半ば以上も狭くしたのであるが、それにも拘らず波が入って上記のような状態が発生したのである。調査の結果周期4秒から6秒の範囲の波が港内に悪い状態を現出することがわかった。これは港の形に起因する現象であるが、特にこの港においては入射する波向と周期に敏感であっていろいろの対策が検討されたがある1つの波向、1つの周期に対して良い結果を得る消波の方法がそれ以外の波向周期の場合にはほとんど効果を発揮しないというようなことが判明した。この港の場合も港内で波が高いのは、比較的狭い港口から入った波が港内の直立壁によって反射されていくつもの方向に進行し、それらが何処かで合成されることに原因がある。したがって港内の静穏を保つための対策としては最も

適した位置に消波構造を設けて、港口からの波のエネルギーを港の奥の方へ入れないようにするのが良い。模型実験により種々の位置にいろいろ異なった型の消波構造を置いた場合の効果が検討されたが、いずれの方法によっても、海岸線に直角方向から来る波、すなわち港口および航路の中心線の方角に進行してくる波に対してはあまり波向が減衰しなかったといわれている。

c) 類似港¹⁹⁾

この港は北海道の日高海岸に位置し太平洋に面して図-7のような形をしている。図の中央下方に見える東邦オリビン埠頭は、港の形が次第に整ってきた一番最後の時期に完成を見たのであるが、この直立岸壁が出現して以来、港内にそれまでに経験しなかった波が発生した。それはある特定の周期を持った沖波が来襲した場合に港内全般では港に支障を生ずるような波が認められないのに、図中右手に見える延長100mの岸壁の一端に近いA地点附近において異常に高い波（三角波に近いような波）が発生し、しばしば岸壁のエプロン上に打ち上げ、コンクリートスラブが破壊されるというような事態を生ずるに至った。またこれほど激しくない場合でもA、Bの間では、小型船はほとんど繋船できないことが多い。現地調査の結果、この現象は図-8に示すように防波堤の頭部より回折を受けて進入した波が正面にあるオリビン埠頭の岸壁で反射されて港内に入り、防波堤で再反射されて、物揚場のA地点に到達するが、それが直接オリビン埠頭から来る波と合成され異常波高を生ずる結果によるものであることがわかった。

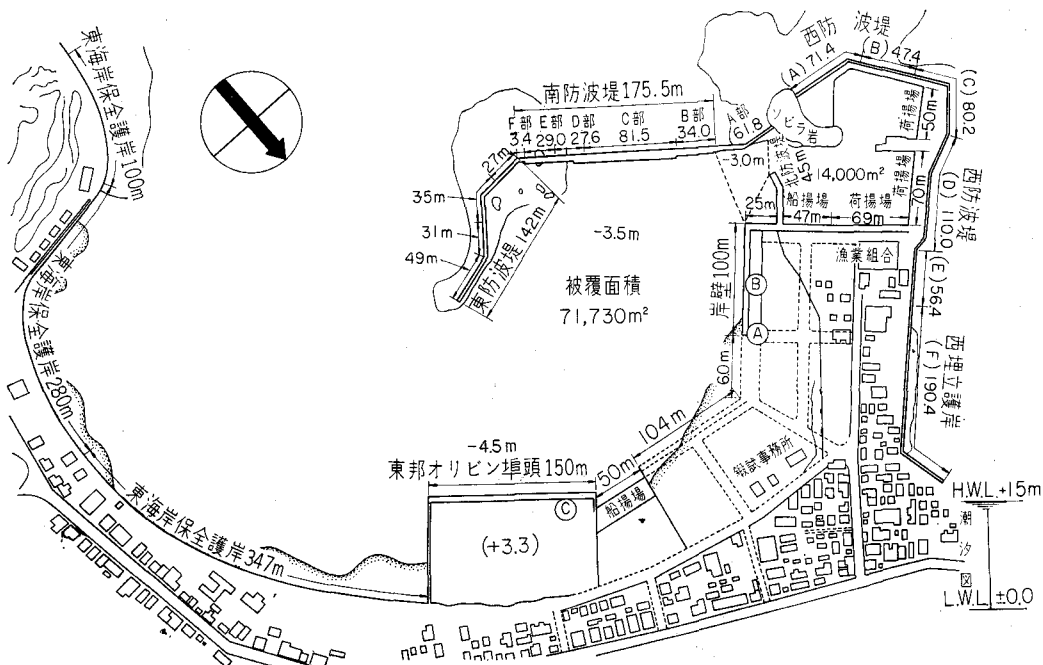


図-7 様似港一般図

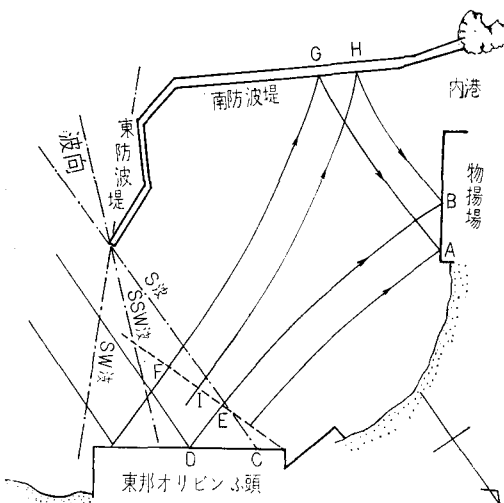


図-8 様似港内における波の進行経路

この港の場合の解決法としては、外かく防波堤の延長、および南防波堤内側における反射を減小させるための消波構造新設のいずれかまたはこれら両者の組み合わせということが現実と考えられる（オリビン埠頭を今から消波構造に改造することは実際問題として困難と思われる）。

d) 留萌港²¹⁾

留萌港は北海道中央部に位置し日本海に面した石炭、木材などの積出しを主とする重要港湾である。

図-9に示すのは同港の外港部であるが、この部分は航路維持が主目的であって泊地としてはほとんど利用されていない。図では省略されているが、内港入口から奥の方にL字型の泊地が続きその周囲は全部直立岸壁によって囲まれている。この港においては冬期季節風の時期になるとW~WNの方向より巨浪が来襲する。図-9に破線をもって示してあるように南防波堤堤頭部より回折によって港内に侵入

した波は北防波堤に接続する導流堤の直立壁によって反射され、矢印の示すように外港内の奥の方に進行し、ちょうど内港の入口付近においてそれが収れんするような結果になる。沖波の周期によってその位置は多少変化するが大体において内港の港口前方あるいはそれよりも南防波堤寄りの物揚場前面になる。この物揚場の上に仮置してあった25 tonのテトラポッドがこのような悪条件の際の合成波を受けて移動するという事態が発生した。また内港入口前面に高い波が起こるので内港の静穏が甚しく阻害される。このような現状に対する改善策としては前の例と同様に、南防波堤および導流堤のそれぞれ必要な場所に消波構造を設け、反射率を小さくすることが

考えられる。

e) 瀬棚港

瀬棚港は北海道南部の日本海に面した地方港湾である。同港は図-10のような形をしているが、港内の四周を直立壁によって囲まれている。W~SW 方向から来襲する波は容易に港内に入し、四方の直立壁によって反

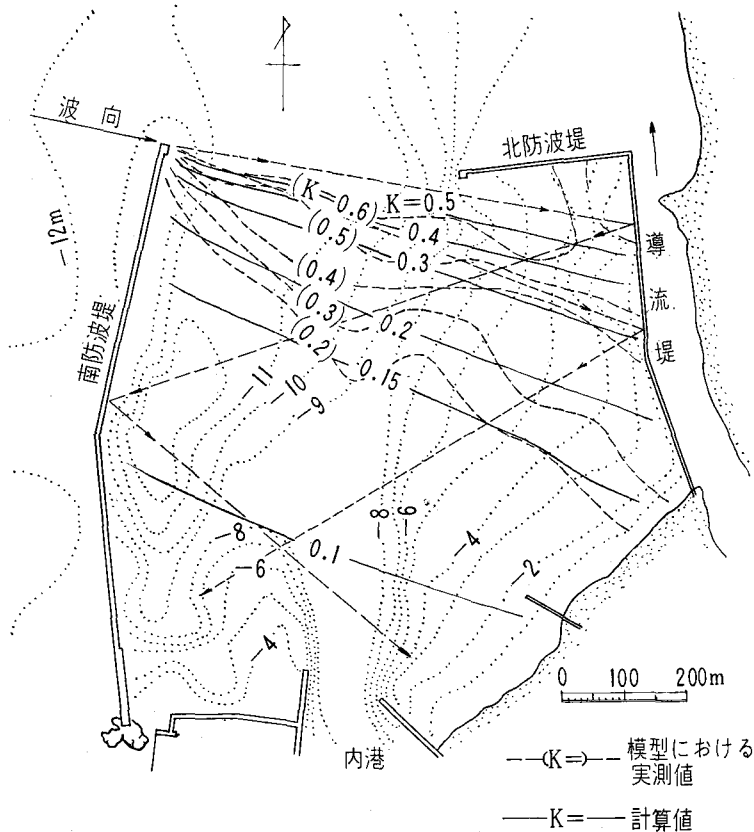


図-9 留筋港外港部における港内波

射される複雑な形の港内波を発生するが、その主たるものは、北側の取付道路護岸に平行な nodal line を有する定常波であって、それが特に図のA地点において異常に高くなり、岸壁上の上屋にしばしば被害をおよぼすのである。また上屋前面の物揚場の水面においては、B部と旧南防波堤の先端によって形づくられる矩形水域内に短周期の副振動を生じて繋船や荷役作業に支障を生ずる。この港は港内が狭いので短周期のふつうの風波によってこのような港内の振動を容易に生じ易いという欠点を持っている。

改良の方法としては先ず第1に南防波堤を延長して港内に入る波のエネルギーをできるだけ遮断することが考えられるが船舶の航行上よりその延長にも限度があるので他に港内において適当な消波の手段を講じなくてはならないであろう。

f) 和歌山北港²²⁾

昭和40年4月に運輸省第三港湾建設局より刊行された「6420号台風に関する調査」によれば和歌山北港(図-11)においては港の護岸④が港口より入った波により破壊されたとあるが、これは港口から入った波が前面の岸壁で反射され、湾の形と相俟って④の部分に波が集中したものと考えられる。

g) Marina Del Ray 港²³⁾

この港は北米太平洋岸の Santa Monica 湾に面し Los Angeles から15哩ほど西に位置する小型船(主とし

てヨットなどの遊覧用ポート) 専用としては最初に試みられた大規模な港である。港は図-12のように大そう複雑な形の泊地より成っていて、飛浪およびうねりを直接うける。港の設計は1956年に完了したのであったが、その当時はまだ現在ほど海岸工学の知識が進んでおらず設計に用いた資料も不十分なものであったため、港の完

成後に港内がどのような状態になるか予想できなかった。中でもこのような複雑な形の泊地による共振現象の影響が大きく、このために泊地内の波高は入射波の2倍にも達し、港の施設ならびに入港している船に大きな損害を与えた。これにはうねりによる比較的周期の長い波が影響を及ぼした。この港においてはこのような状態を改良するため、港口外に離

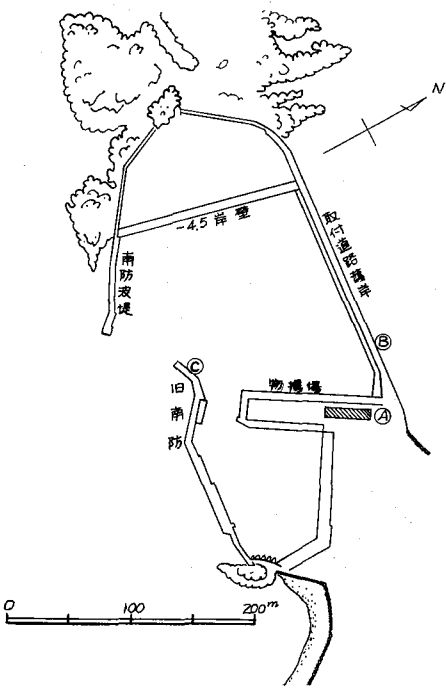


図-10 瀬 棚 港

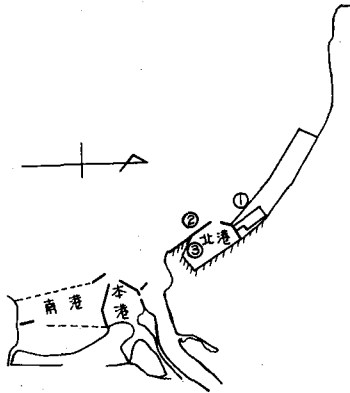


図-11 和歌山北港(文献22)による)

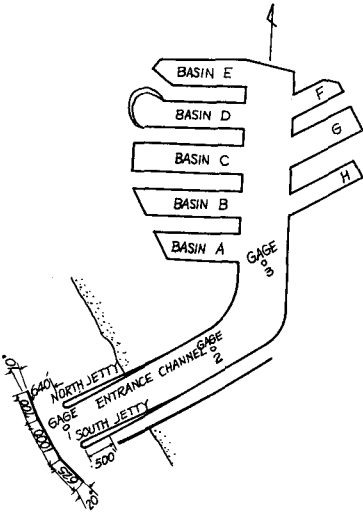


図-12 Marina Del Ray 港改修計画
(Chares E. LEE¹⁴⁾ による)

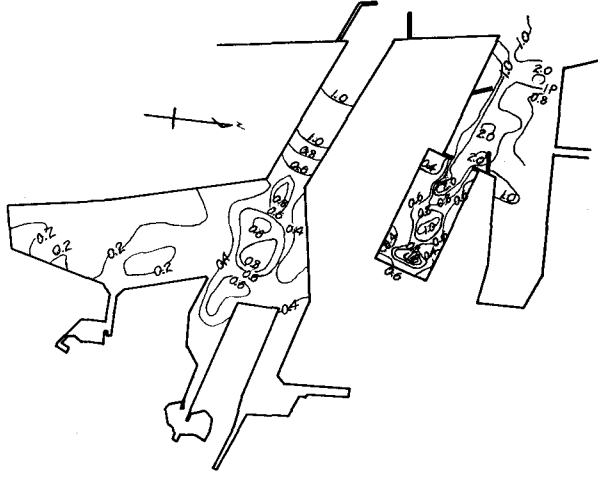


図-13 新 埦 港 (岩垣, 石原, 吉田¹⁹⁾による)

岸堤を置くことになったが、これだけではまだ不十分で、航路および泊地内の諸施設および護岸の設計にあたって、波の吸収を考慮することなどが模型実験によって検討された。

以上は現存する港に関する事例であるが、次に、同様な問題を含む計画中の港の例として

h) 新堺港¹⁹⁾

本港は埋立地に建設される工業港であって港を囲む海域の大部分が工業用地として埋め立てられる。したがって港の形も複雑になり、図-13に示すような直立岸壁に囲まれた泊地内においては、港口からの入射波は容易には減衰せず、反射、合成を繰り返しながら港奥に進むことが予想されるので、南泊地および北泊地のそれぞれについて港内の波の模様を詳細に調べるための模型実験が行なわれた¹⁹⁾。この実験においては港口の外側に防波堤を配置する計画の他に、港口から泊地へ至る航路の両側を消波構造にするとか、奥の泊地への入口に特殊の形の消波装置を設けるなど種々の案が検討された。

(ii) 海岸堤防、護岸、防波堤の場合

a) 須磨、塩屋間の海岸堤防の例²⁴⁾

昭和35年当時、須磨と塩屋間海岸は著しい浸食を受け、砂浜が急に減少して海岸堤防の根固めが洗掘されたり、従来の防砂突堤が破壊されたりした。そのため 10m/sec. 以上の南風が吹くと波高 1~1.5m 程度の波でも越波あるいは堤防根固めに衝突する波による跳波を生じ、堤防天端を越えて国鉄山陽線上に落下し、同線の電車はしばしば運行を停止せざるを得なかった。このような場合には堤防前面に消波構造を設けることにより、越波、跳波は非常に減少する。

b) 昭和37年第2室戸台風による被害例²⁵⁾

第2室戸台風による、運輸省第三港湾建設局管内の災害は720ヶ所、57億に達し全国の約75%を占め、その中でも特に和歌山県の被害が甚大で全国の27%に達したといわれている。海岸構造物におけるこの時の被害の特徴は被害を受けた構造物のほとんど全部が越波によって叩かれて破壊されたり裏込めを洗われて倒れたものである。

和歌山、下津港においては高潮高浪を受け、各所において防潮堤、護岸が越波により破壊され浸水、交通路遮断、浸食などの被害を受けた。水軒浜では+6.70mの角落しの上を約1m越えて浸水し、片男波海岸では+7.5mの防潮堤を越波して排水路を破壊した。防潮堤の断面が波のはいりやすい形をしていたので、波のはいりによって越波したものと考えられた。

また紀伊水道沿岸の湯浅広港、由良港の両港も和歌山港につぐ大きな被害を受け、湯浅広港のブロック積防波堤は先端部と基部のわずかの部分を残して大部分がバラバラに破壊された。湯浅町の防潮堤（天端高+7.0m）の破壊はわずかであったが、天端を越えた波と径10cmくらいの玉石の打ち上げによって背後の人家がかなり倒壊した。

また岸和田港においては、南側の防潮堤が越波のため、被覆のない裏側を洗掘され、胸壁背面のコンクリート舗装が破壊された。

以上2、3の海岸堤防、護岸などの被害例から見ても、これらの構造物においては越波によって裏込めを洗掘されないように天端を高くしたり被覆することはもちろん大切であるが、もっと根本的に、なるべく越波を阻止するように防潮堤前面に根固めを兼ねた消波構造を設けることが必要と考えられる。

3. 消波構造の分類とその機能

3-1. 概 説

消波構造と考えられているものを、その消波機能に関して分類すると

- (a) 主として斜面上の表面摩擦損失によって波のエネルギー減殺をはかるもの
- (b) 構造物の内部にある多数の空けきを通過する際に生ずるタービュレンスによって波のエネルギー減殺をはかるもの
- (c) 波の共振現象 (resonance) を利用するもの

の3つの形に分けることができる。(a)に属するものには古くより利用されている斜面があり、自然の海浜もその1つである。(b)に属するものとしては各種の異形コンクリートブロック（消波ブロック）による消波堤、または石積みの表面を消波ブロックによって被覆した構造物が代表的な例であるが、本来の捨石堤もこれに属する。(c)は近年になって考えられた新しいタイプの消波構造であって入射波と反射波の位相を180度反対^{6),7),8)}にすることによって、波を消そうとするのが根本的な考え方であって、それをいろいろ応用した構造物である。

また使用目的、使用個所別に分類すると、

- (a) 波の通過を困難にする構造物
- (b) 波の反射を減少させる構造物

上記の空げきや共振現象によるものはこの場合の(a)の目的に適しており、また同じく空げき構造物および斜面は(b)の目的に適し主として港内に用いられるが、護岸や海岸堤防の前面に用いられる場合も多い。

3-2. 主として摩擦損失によって波のエネルギー減殺をはかる型の消波構造

(i) 摩擦損失による波高の減衰

この型式による消波構造の代表は自然の海浜をも含む斜面であるが、最初にまず海底の表面摩擦^{26), 27)} および海底が透過性物質よりなる場合の透水²⁸⁾ による波のエネルギー減殺について述べる。

海底の表面近くにおいては波動運動によって水分子は海底面に平行方向に前進後退の運動を繰り返す。このような振動流によって摩擦損失が生ずるのであるが、この場合には海底面の粗度の高さに較べて境界層厚は薄いと考えられるので、摩擦損失係数は海底の粗度のみにによって支配されると考えてよい。砂浜海岸における海底の粗度としては、砂粒の大きさよりも砂漣の大きさの方が問題である。Putnum および Johnson²⁶⁾ はこのような観点より海底の摩擦損失係数 k を

$$\tau = k\rho U_h^2$$

(ただし U_h は海底表面における振動流速)

と定義し、 k と波高減衰との関係を求めた。ただしこの場合の海底こう配はかなり緩い(例えば 1/300)、したがって波長に比較して長い距離を波が伝播するような場合で、ふつうに発生する波の周期(1/300 こう配で周期 12 sec.) の範囲内においては、海底摩擦($k=0.01$ と仮定した場合)によって、沖波波高の約30%も減衰することを示した(図-14)。しかし摩擦係数 k の値に関しては、現在波高観測の結果に基づいて k を求めようとする

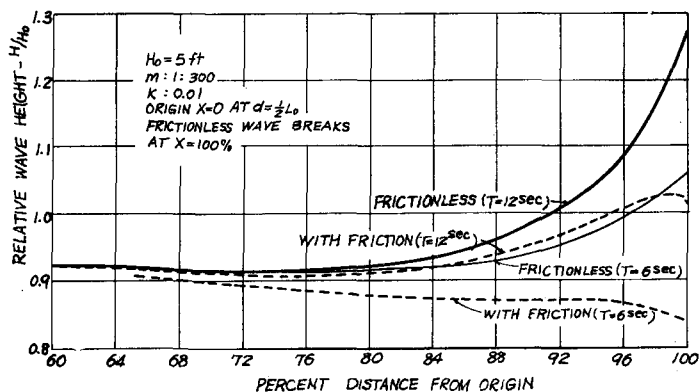


図-14

(Putnum and Johnson²⁶⁾ より)

試みの詳しい研究³⁰⁾が行なわれている段階である。なおこのような例は緩こう配の自然海浜においては海底摩擦によって波高がかなり減衰する(すなわち消波が行なわれる)ことを示すものではあるが本文で取り扱う消波構造の直接の対象とはならない。

同様に自然海浜の場合、海底が透水性物質よりなる場合にはその内部へ透水することにより波のエネルギーの一部が吸収されることを Putnum²⁸⁾ が明らかにしている。彼の計算によるとごく緩こう配の海浜でふつうどこにでもあるような海底物質、およびふつうに起こる程度の波の周期の場合にはこの原因によって約10%の波高減衰が見られるといっている。しかしこれも前の場合同様、直接に消波構造とは結びつかない。

消波構造として直接の対象になるのは、自然海浜の海底こう配に較べれば遙かに急こう配の斜面である。このような斜面に波があたると斜面上で砕波し、さらに斜面上を高速水流となつてはい上ることにより砕波の際のタービュレンス、はい上りの際の表面摩擦抵抗その他によって大量のエネルギーを消費しその結果残った一部のエ

エネルギーによって反射波が形成される。したがって反射波の波高を測ることによって、斜面上で消費されたエネルギーを求めることができる。あるいは逆に消波効果のよい斜面ほど反射率が小といえる。われわれが消波構造を必要とするのは主として反射波を減少させたい場合であるから、反射率の大小を知ることがその構造物の消波構造としての優劣の指標となる。

いま自然海浜の海底こう配のような緩こう配から直立壁に至るまでの 90° の範囲内でこう配を幾通りにも変えた場合にこう配と反射率との関係を求めることが多くの研究者によって行なわれている^{27), 29), 31)}。この場合、入射波の波形こう配、斜面の粗度、斜面の透水性などの要素がパラメーターとしてはいつてくる。

(ii) 反 射 率

このような斜面による波の反射の研究に当っては Healy²⁷⁾ が行なったように斜面によって反射された波が完全に線波源から来た波と考えられる程度、十分に斜面から離れた位置において部分重複波の波形を調べる方法がふつう行なわれている^{29), 31), 32)}。すなわち波は微小振幅波であると仮定し、入射および反射波をそれぞれ

$$\eta_0 = \frac{H_0}{2} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

$$\eta_1 = \frac{H_1}{2} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} + \frac{t}{T} \right)$$

であらわす。この場合 H_0, H_1 はそれぞれ入射波および反射波の波高であるが、波長および周期は両方とも等しいものとする。入射波と、斜面よりの反射波とが合成されて

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{H_0}{2} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{H_1}{2} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} + \frac{t}{T} \right) \\ &= \frac{1}{2} (H_0 + H_1) \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{x}{L} - \frac{1}{2} (H_0 - H_1) \sin 2\pi \frac{t}{T} \cos 2\pi \frac{x}{L} \end{aligned}$$

ゆえに、 $\sin 2\pi x/L = \pm 1$ 、すなわち $x = nL/2 + L/4$ (ただし n は整数 $0, 1, 2, \dots$) のところでは全波高は $H_0 + H_1$ となり、 $\cos 2\pi x/L = \pm 1$ すなわち $x = nL/2$ のところでは全波高は $H_0 - H_1$ となる。したがって $L/4$ だけの間隔において最大の全波高と最小の全波高があらわれる。それゆえ、これら両方の全波高を測定すれば次のように反射波の波高を求めることができる。すなわち

$$H_{max} = H_0 + H_1, \quad H_{min} = H_0 - H_1$$

であるから

$$H_0 = \frac{1}{2} (H_{max} + H_{min})$$

$$H_1 = \frac{1}{2} (H_{max} - H_{min})$$

したがって反射率を R とすれば

$$R = \frac{H_1}{H_0} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}}$$

により求められる。

(iii) 斜面による消波効果に影響を及ぼす諸要素³²⁾

この項に関しては同じく水工学シリーズの No. 64—08 「海岸堤防論」において岩垣博士が述べておられるので参照されたい。

3-3. 空けきを通ずる際のタービュレンスによって波のエネルギー減殺をはかる型の消波構造

(i) 構 造

この型式の消波構造物として最も代表的なものは各種の異形コンクリートブロックによって成形されるマウンドまたは斜面^{33), 34), 35)}である。使用するブロックの形によって、それぞれ特徴ある空けきが形造られる結果、その空けきが消波に威力を発揮するのである。

ふつうの粗石積による捨石堤、実験水槽に用いられる小規模な金網束や金属切削片による消波装置などに至るまで、構造体の内部に全体積の $1/2$ 前後あるいはそれ以上の容積の空けきを有する構造物がこの分類に属する消波構造である。参考までに現在工事に使用されている各種異形コンクリートブロックの有する空けき率を示せば表-1 のようである。

表-1 各ブロックの空げき率 (%)

名 称	捨 石	コンクリート方塊	テトラポッド	トリバー	六脚ブロック	中空三角ブロック	ホロースケア	Akmon	Bipod	Tripod
空げき率	45	47	52	53	40~80	66	49	60	61	53

またそれらによるマウンドの断面形は図-14に示すように異形コンクリートブロックを台形状に積上げた独立の消波堤および護岸または防波堤の前面に三角形断面に積んだ斜面による消波堤のように、マウンドの表面は大きな粗度をもった斜面をなすものがほとんどである。代表的ないくつかの例をあげれば、前出の図-1¹⁾ (由比海岸堤防)、図-2²⁾ (大分臨海工業地帯1号地前面護岸)等はテトラポッドを用いた消波堤の1例、図-3²⁾ (留萌港南防波堤断面)は同じくテトラポッドを用いた消波堤であるが、防波堤断面の一部をなしている例で、これらはいずれも越波防止および堤体または護岸に働らく波圧減少をはかることがその目的である。図-15は中空四脚ブロック(ホロースケア)を埋立護岸の前面捨石上に被覆層兼消波堤として使用した和歌山北港の例である。

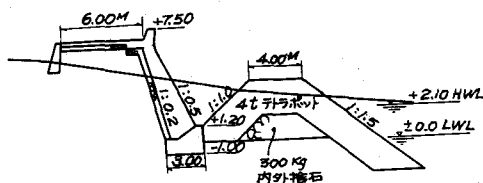


図-15

消波ブロックによるマウンド (文献(25)による)

3-2. において述べた斜面(主として不透過性の)は反射率を減少させる目的に用いられる場合が多いが、この空げきを有する構造の場合は反射率の減少ももちろんであるが、その他に防波堤、海岸堤防、防波護岸などに併設して、それら本体に対する波力の減少を図り、また越波やはい上りを阻止するという目的に用いられる場合の

表-2

実験波の特性 $T=1.25\sim 1.37\text{sec.}$ $L=1.91\sim 2.52\text{m}$
 $T=1.45\sim 1.55\text{sec.}$ $L=2.41\sim 2.82\text{m}$

波の $T_m=1.5\text{sec}$ ($T_p=6.7\text{sec}$).

基礎捨石堤の構造	h_1 (cm)	H (cm)	H/L	碎波状況	最大波圧強度 $p_{\max}$ (g/cm ²)	比率 (%)
板張り	7.0	13	0.049	碎波し跳波1m以上	70	100
	13.0	15	0.053	碎波し跳波大	102	100
砕石	7.0	12	0.059	碎波し跳波1m以上	80	114
	13.0	15	0.052	弱く碎波、跳波50cm	30	30
テトラポッド (上層倒)	7.0	14	0.054	碎波し跳波30~50cm	80	114
	13.0	17	0.062	碎波になる直前	23	23
テトラポッド (上層正)	7.0	15	0.054	碎波し跳波50cm	60	86
	13.0	16	0.056	碎波せず跳波殆んどなし	85	83
四面体 (上層倒)	7.0	13	0.053	碎波し跳波50cm	60	86
	13.0	15	0.060	碎波し跳波40cm	60	59
中空ブロック No.1 (大)	7.0	12	0.045	碎波しにくい跳波50cm以下	60	86
	13.0	16	0.059	碎波せず重複波に近い	15	15
中空ブロック No.2 (小)	7.0	13	0.051	碎波し跳波1m以上	70	100
	13.0	15	0.057	碎波せず跳波なし	26	26
中空ブロック No.3 (大)	7.0	12	0.046	碎波せず遡上する	40	57
	13.0	15	0.055	碎波せず水量が多い	35	34
四面体 (一層固定)	7.0	13	0.051	強く碎波し跳波1m	50	71
	13.0	15	0.056	大きく碎波する	41	40

方が多い。したがってこの種類の構造に関しては消波効果の判定には、波のはいり、波力の減殺程度、および波の反射率の3項目について、それぞれ比較を行なう必要がある。

(ii) 消波効果に影響する各種の要素

空げき構造に波が衝突して波のエネルギーが吸収され、したがって波力が減殺され、うち上げ高さが小さくなり、越波が無くなり、さらに反射率が減少することは実験室における多数の実験および実際に施工された実地例により確かめられている事実である。しかしこれを空げき率がどのように変化した場合に波力が最も効果的に減殺されるか、あるいは同じ空げき率であっても個々の空げきの大きさとか形は影響しないであろうかなど細部について調べて見ようとしても、まだ現在のところではそれらに対して必要な資料が得られない。この方面に関しては今後の研究にまつ必要があろう。また、はいり高さおよび越波量の差によって比較する場合であっても、これらの諸量は例えば反射率の測定に用いる。

Healy の式のように明確な定義を与えたく、さらに越波の場合には風の影響も考慮されるなどして、実験を担当する個々の研究者の経験的要素に頼る度合が大であるため、甲と乙との実験結果を直接比較結論を得るにはまだなお資料不足で時期尚早の感をまねがれない。いましばらく多くの場所でより正確な資料の集積、検討が加えられた後に判断が下されても良いように思われる。実際のところ各種の異形コンクリートブロックに関する消波性能の比較は、消波性能の定義、それらの測定法について見てはかなり困難な問題であるように考えられる。さらにこれらのブロックは単に消波性能が良いばかりでは実用の役に立たず、必ず構造体を構成した際の安定という要素を伴っているのである。いま参考までに数年前の資料であるが永井^{33),36)}が実験結果をまとめたものを表-2,3,に掲げる。

これらの実験は図-16のような混成防波堤の基礎捨石部(のりこう配1:1.5)を表に記載してあるような種々の構造にした場合に関して得られた結果である。表よりわかるように、波圧、はいり、反射の3つの指標が

$H=10\sim19\text{cm}$
 $H=9\sim16\text{cm}$

$H/L=0.040\sim0.082$
 $H/L=0.038\sim0.062$

最大同時波圧 の合力 P g/cm)	比 率 (%)	ブ ロ ッ ク の 安 定 度	力 積 (g・cm/sec)	力積/ 運動量 (%)	エ ネ ル ギ ーの比率 (%)	越 上 高 R_u (cm)	反 射 率 (%)
452 510	100 100	—	355×10^3	61.7	38.0	23~26 27~32	45 28
331 405	74 79	—	—	—	—	16~18 25~30	29 21
376 291	83 57	転 倒 " "	—	—	—	21~26 22~25	54 28
292 441	66 87	上層が動く "	314×10^3	54.6	29.8	21~23 22~25	36 27
302 588	67 115	頂点のブロックがわずか 動く 不安定 一部転落	189×10^3	34.4	11.8	21~26 25	24 33
242 216	54 42	安 定 安 定	127×10^3	21.3	4.5	16~18 20	37 20
314 400	70 78	大きく動揺 わずかに動揺	—	—	—	20~23 28~33	36 10
248 476	55 93	動 揺 動揺して落下	—	—	—	26 20~24	30 33
222 473	49 93	—	173×10^3	29.7	8.8	21~23 25~30	38 38

表-3 波の周期 $T_m \div 1.3 \text{sec}$

基礎捨石堤の構造	h_1 (cm)	H (cm)	H/L	碎波状況	最大波圧強度 p_{max} (g/cm ²)	比率 (%)
板張り	7.0	14	0.063	大きく碎波	65	100
	13.0	18	0.073	大きく碎波	58	100
砕石	7.0	15	0.072	碎波し跳波1.5m	75	115
	13.0	18	0.082	碎波せず	55	95
テトラポッド (上層倒)	7.0	15	0.063	碎波し跳波1m以上	65	100
	13.0	18	0.078	碎波せず	37	64
テトラポッド (上層正)	7.0	15	0.068	碎波する	80	123
	13.0	19	0.079	碎波せず	29	50
四面体 (上層倒)	7.0	15	0.053	完全碎波跳波1m	60	92
	13.0	18	0.069	碎波直前引波大	40	69
中空ブロック No.1 (大)	7.0	14	0.058	弱く碎波跳波1.5m	75	115
	13.0	18	0.077	小さい波碎波せず	16	28
中空ブロック No.2 (小)	7.0	14	0.055	完全碎波跳波1m	65	100
	13.0	18	0.072	碎波せず	24	41
中空ブロック No.3 (大)	7.0	15	0.064	碎波せず遡上する	30	46
	13.0	17	0.073	碎波せず水量多い	32	55
四面体 1層固定	7.0	14	0.062	強く碎波	85	131
	13.0	18	0.072	強く碎波	39	67

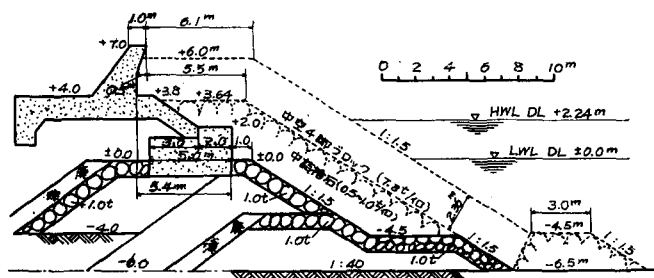


図-16 和歌山北港埋立護岸の消波堤

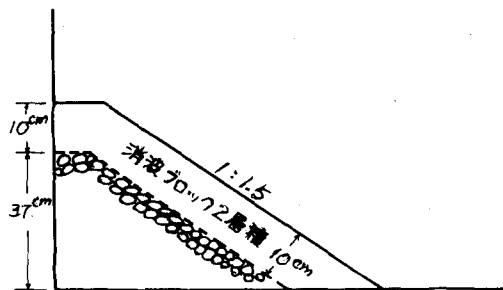


図-17 実験に用いたマウンドの形(永井³⁶⁾による)

同じような条件の下においても必ずしも皆そろって優劣を示すとは限らない。これより見てもそれぞれ主たる目的を生かすように、環境条件を考えて各種のブロックを巧みに使用するのがよいように思う。

以下、資料の許す範囲で 2, 3 の比較を試みよう。

(a) 透過性の影響

空げき構造物の透過性または空げき率と、それによって影響される波圧、はい上り高さ、越波量などの関係は、それが空げき率によって影響されるものであることは、認められているが、まだ定量的には求められていない。斜面の表層を空げきを有する材料で被覆した場合（被覆層の厚さ 10cm 実験に用いた波高 10~15 cm）、空げき率の変化と、うち上げ高さの関係を調べた実験³⁷⁾によ

ば、図-18のような結果が得られている。これによって見ると空げき率をガラス玉を用いて、32.6%、38.5%、40%に変えて試験しているが、この範囲の変化では空げき率は、うち上げ高さにはほとんど影響していない。この場合には7°、10°、15°、というこう配の変化による影響の方が遙かに大である。

($T_p \approx 5.8\text{sec}$)

最大同時波圧 の合力 P (g/cm)	比 率 (%)	ブ ロ ッ ク の 安 定 度	力 積 (g·cm/sec)	力積/ 運動量 (%)	エ ネ ル ギ ー の 比 率 (%)	遡 上 高 R_u (cm)	反 射 率 (%)
452 725	100 100	—	262×10^3	44.4	19.7	26~31 35~37	32 22
375 329	83 45	—	—	—	—	28~31 35~40	36 33
481 513	106 71	上層のテトラポッドが 転倒する	—	—	—	31~36 35~40	40 31
400 417	89 58	安 定 "	129×10^3	24.0	5.8	31~36 30~40	29 20
366 548	81 76	不安定 数個のブロック 落下	189×10^3	30.6	9.4	26~31 35~37	24 33
343 192	76 27	安 定 安 定	87×10^3	13.9	1.9	26 30~32	33 33
274 365	61 50	頂部のブロック一部動揺 不安定	—	—	—	26~31 36~41	24 17
105 432	23 60	一部動揺 一部落下	—	—	—	21 30	31 36
402 527	89 73	—	184×10^3	29.4	8.6	25 30~35	20 50

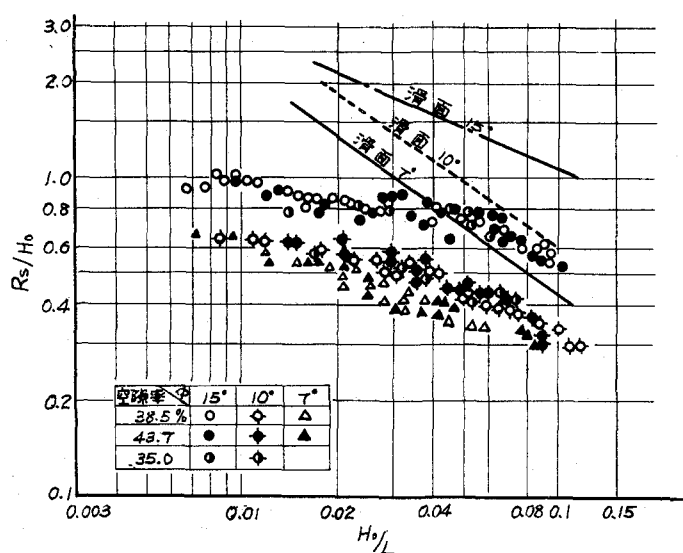


図-18 被覆層の空けき率，斜面こう配とうち上げ高さとの関係

Straub, Bowers, Herbrich³¹⁾等は碎石および金網束によって作られた斜面からの反射率を求めている。この実験においては斜面のこう配によってその長さは当然異なってくるが、用いた材料（たとえば碎石）の体積を一定に保つようにした。碎石の径は0.64~1.9(cm), 2.5~3.8(cm), 3.8~5.0(cm)の範囲内でそれによる空けき率は約50%であった。なおこの実験の際の波の波長は60~134(cm), $L/d=2.67\sim5.85$ であった。またこの他に空けき率40%の砂利、同じく45.8%の碎石も使用された。実験の結果、後の2種類を用いた場合の方がかえっ

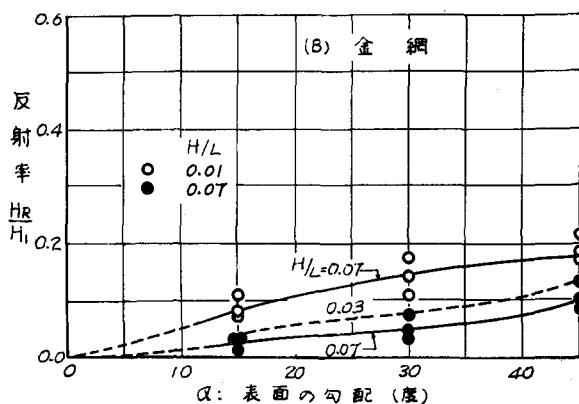
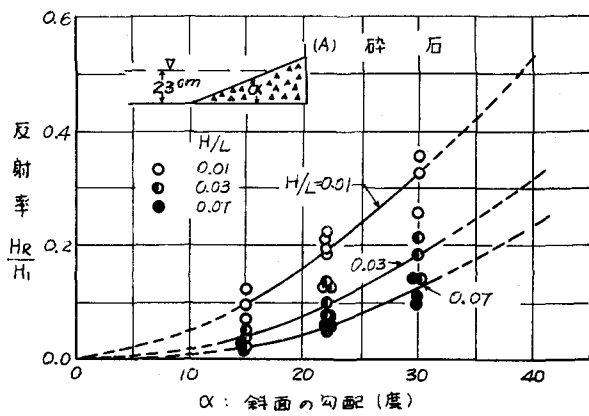


図-19 斜面こう配と反射率との関係
(Straub, Bower, Herbrich³¹⁾)

が波の衝突やブロックの多少の移動によっては変化しないことによると考えられる。」と述べ、さらに「中空ブロックの消波効果はその中空という点にあるが、消波上最も有効な中空の大きさは、波の特性によって違うようで、波高の小さい波ではブロック1個の間げき率が35%くらいのものが25%くらいのものより消波効果がやや大きいようである。しかし波高が約3.50m以上、波形こう配が0.07前後の暴風雨時の波の場合には、ブロック1個の間げき率が約25%のものが消波効果が遙かに大きいようである。水理学的条件およびブロック強度上の条件より、ブロック1個の間げき率は25%くらいが適当であろうと考えられる。このような中空ブロックを2層積および乱積にした場合の間げき率はほぼ66%および60%である。」と述べている。因みにテトラポッドの間げき率は2層積(倒)および乱積の場合66%、50%となっている。

岩垣、土屋および井上による研究¹⁾では、由比海岸堤防前面に16tおよび25t(実物換算)テトラポッドを用いた消波堤により越波量を調べた模型実験結果においては消波工として16tテトラポッドを用いた場合と25tテトラポッドを用いた場合とを比較すれば、16tの方が若干効果が良かったようである。以上いくつかの例に見るように、いずれも消波構造体内の空げき率と消波効果との間の関係について定量的な関係はまだ求められていないが、これらの結果は空げき率または空げきの分散度と消波効果との間には何等かの関係があることを示すものといえる。

また、古谷、鴻上、近藤⁴⁰⁾は次のように空げきの性質を考えて、空げき構造による波圧減少の本質を定量的に把握しようと試みた。すなわち消波ブロックによって構成されたマウンドを、連続かつ規則的な変化をする空げきを有する1つの構造物と見なし、波がその表面で砕けた後は水流が空げきによる多数の流路を通してマウンド後方の壁面に到達するものとする。そのような流路の1つを取り出してこれを管路と仮定し、圧力強度の減少

て反射率が小さかったが、さらに篩分けによって碎石の粒径分布をできるだけ一様にし、空げき率を高めることによって一層良好な結果を得た。図-19にそれが示されている。(A)は上記の碎石による斜面に対する、波の反射率と斜面こう配との関係を波形こう配をパラメーターとしてあらわしたものである。(B)は同じく金網束による斜面に対する今と同じ関係を示したものであるが、斜面こう配15°以下の部分では碎石とまったく同じ傾向である。それ以上になると金網の方がよくエネルギーを吸収する。この時の空げき率は93%であった。

また図-20は同様に斜面の反射率であるが、波形こう配がそれぞれ0.01および0.07に対し斜面こう配を0~45°に変化した場合の実験結果である。このように不透透面、碎石、金網と空げき率が大になるほど消波効果を増すことは明らかであるが、個々の碎石の粒径、空げき率などとの定量的な関係はまだわかっていない。空げき率と消波効果との関係についての研究は上記のように現在までのところまだ少数である。永井が中空ブロックの効果を論じた³⁸⁾中で、「中空ブロックNo.1(大型)の消波効果が特にすぐれているのは2層積、および乱積にした場合に遮蔽された間げきが非常に大きいこと、およびその間げき

を水頭損失で示すと

$$P_d = f_c \cdot \frac{wv_m^2}{2g} + f \cdot \left(\frac{l'}{d'} \right) \frac{wv_m^2}{2g} + N \cdot f_c \cdot \frac{wv_m^2}{2g} \quad (1)$$

$$P_d = p_0 - p_a$$

ここに p_0 : 直立堤のみの場合の波圧強度,

p_a : 被覆後の波圧強度, l' : 流れの通過する距離, d : 空けきの平均径, d' : ブロック個体の大きさ, v_m : 空けきを通る流れの平均流速, f_c : 流入損失係数, f_c : 個体形状による損失係数, N : 考える流路中の個体の数, w : 水の単位体積重量, g : 重力の加速度,

(1) 式で流入後の速度は v_m をそのまま用いる。 l' は複雑な径路をもつ長さであるが、これは被覆厚 l に比例するものとする。空けきの平均径 d' はブロック個体の大きさ d に比例するものとする。したがって N は l/d であらわすことができる。次に(1)式の $wv_m^2/2g$ の項を圧力に書き改めると

$$k \cdot \frac{wv_m^2}{2g} = \frac{p_0 + p_a}{2} \quad (2)$$

(k は係数)

(2) 式および上述のことから (1) 式は次のようになる。

$$\frac{2P_d}{p_0 + p_a} = C_0 + C_1 \left(\frac{l}{d} \right) \quad (3)$$

ここに C_0, C_1 は (1) 式の損失係数を整理したもので (2) 式の k をも含ませたものである。いま

$$P_d/p_0 = D_p \quad (4)$$

とおくと D_p は圧力減殺の割合を示す。(4),

(1) 両式より (3) 式は

$$\frac{2D_p}{2 - D_p} = C_0 + C_1 \left(\frac{l}{d} \right) \quad (5)$$

(5) 式によって l, d の各種について p_a を測定し、直立堤の場合の p_0 から実験的に C_0, C_1 を求めることができる。図-21 にその結果を示す。

(b) 表面粗度の影響

この問題に関しても現在までのところ、定量的なデータはほとんどない。不透過性斜面の表面に粗度を附して斜面こう配と共に粗度がうち上げ高さに及ぼす影響を実験的に求めたものはあるが、異形ブロックまたは捨石などによる透過性マウンドの場合の表面粗度の影響に関して特に調べたものはないようである。

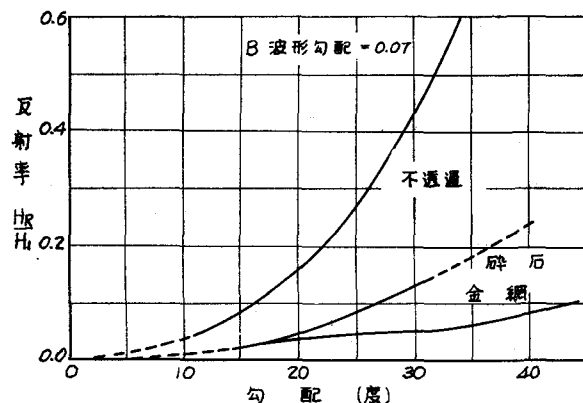
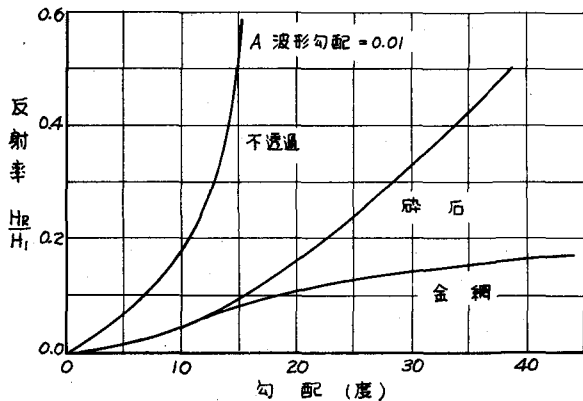


図-20 不透過表面をもった斜面、碎石および金網による消波構造の比較 (Straub, Bawer, Herbrich³¹⁾)

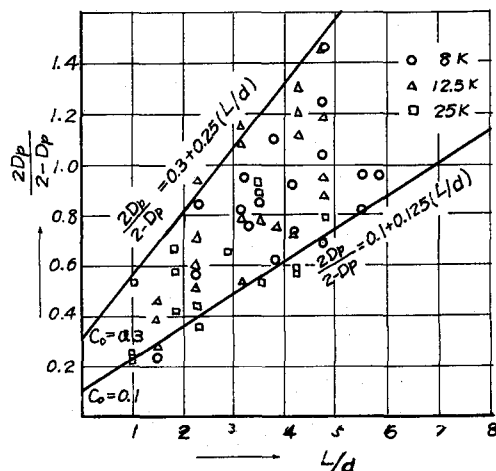


図-21 波圧減殺率: D_p と (l/d) の関係 (古谷, 鴻上, 近藤⁴⁰⁾による)

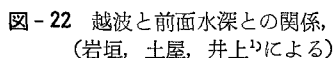
捨石マウンドの表面に被覆兼消波用として1層または2層に配置された消波ブロックが存在する場合、これはもちろん粗度として波のエネルギー吸収に対し効果はあるが、それは前面水深が小さく、かつ波高の低い場合のことである。この場合には摩擦抵抗の影響はかなり大きい、水深が大で波高も高い場合には粗度による影響は少なくなり、ブロック層内に遮蔽された空げきの影響の方が大きくなる。すなわち消波用ブロックの場合には表面の粗度よりも空げき率の方がより重要である。

のり先水深の大小は消波効果に大きな影響を及ぼす。図-22¹⁾は堤防ののり先水深と越流量との関係を、堤防の天端高さをパラメーターとして表わしたものであるが(前出の図-1参照)、これによれば16t テトラポッドの2層積よりなる消波堤を設けたときにはそれを設けない場合よりも越流に及ぼすのり先水深の影響が大きくなる。すなわちのり先水深はこの種の消波構造の効果に大きく影響するといえる。

大になると直立壁だけの場合には重複波の波圧となるのに、消波堤によって碎波し、波圧が大きくなる場合のあることを示すものである⁴¹⁾。

(i) 波の共振現象 (resonance) を利用するもの。

その1つはフランスの Chatou 水理実験所において J. Valembois 等によって開発されたものであって、フランス電力会社が特許を持っている。この共振装置の原理は図-24のような水路の片側（または片側）に幅が入射波の波長の1/2、奥行が波長の1/4の長さを持った resonant basin を設けることにより、この basin で反射される波の位相が180°だけ反対になるという現象を利用したものである。この消波装置の効果は basin 前面の（または向い合った basin 間の）水路幅によって変る。図-25のように前面に直立壁がある場合は効果がなくなるが、このような場合には2つの隣り合った basin を設けるとよい。この種の消波構造は港口とかドックの門扉の前面（図-26、図-27）などに設けられ、入射波の周期が T から $2T$ の範囲にある



ときは、図-26、27のようにこの間を適当に分割した幅 W と奥行入を持った数個の resonant basin を設置しなくてはならない。図-28、図-29はそれぞれのデイメンションを持つ basin についての実験結果で、反射率と周期の関係をあらわす。

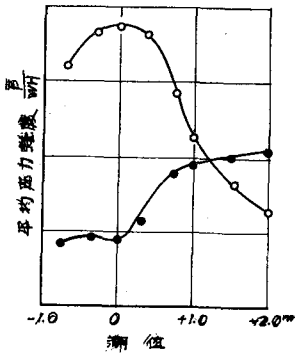
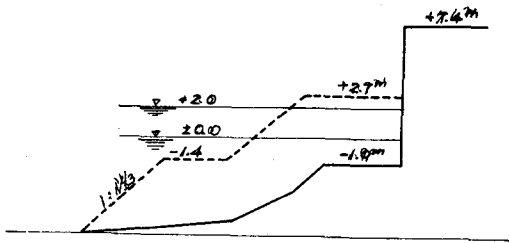


図-23 潮位と消波工による波圧変化との関係 (本間、堀川、長谷⁴¹⁾による)

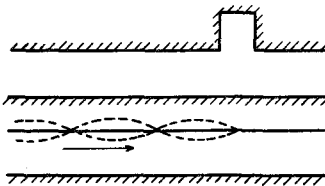


図-24 (Valembois⁶⁾による) 共振現象を利用した消波装置 (i)

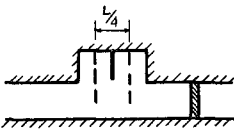


図-25 共振現象を利用した消波装置 (ii)

(ii) 入射波と反射波の位相差による方法⁸⁾

図-30のような形の港においては、ふつうの直立防波堤の場合には 港口より入った波が防波堤 によって港内の奥の方に反射される。この場合に防波堤内側の波を受ける部分を図のような形の階段形 (平面的に見て) の折線よりなる構造にする。波の入射方向に向いている正面は透過性の斜面とし、その両側壁はなるべく不透過構造とする。1つの反射正面と隣接する反射正面との距離は

$$\frac{L}{4} + n \frac{L}{2} \quad (n=1,2,3,\dots)$$

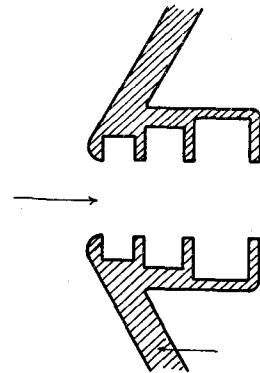


図-26 Resonant-basin の応用例 (i)

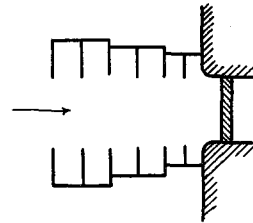


図-27 Resonant-basinの応用例 (ii)

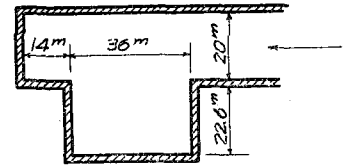
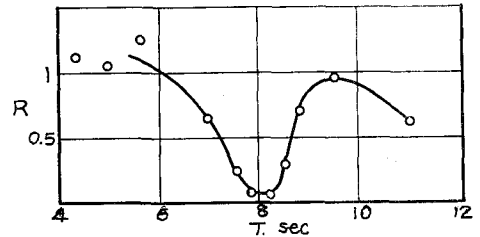


図-28 Resonant-basin に関する実験結果

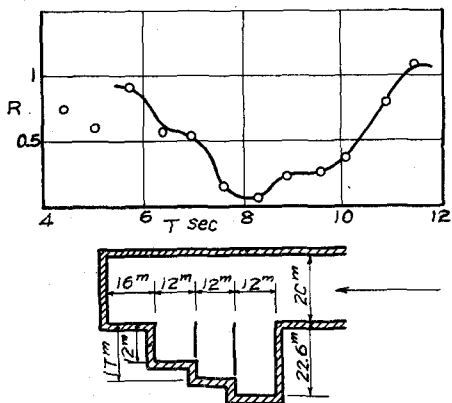


図-29 Resonant-basin に関する実験結果

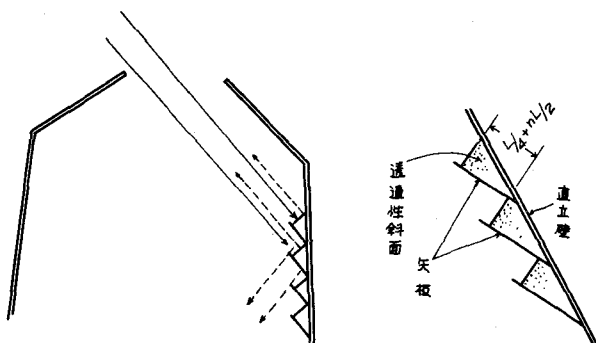


図-30 消波装置略図 (Per Brunn⁸⁾ による)

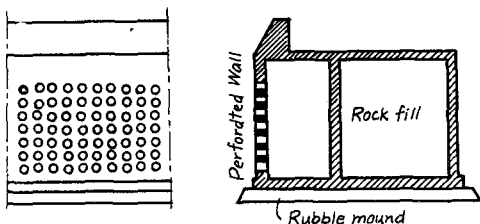


図-31 低反射率防波堤 (R. Boivin⁴⁴⁾ による)

孔を水流となって内または外へ向って通過する際に乱流拡散によって失なわれるが、その効果は室内外の水位差および孔を通過する流量によって異なるものであるから、したがって、波の性質、水位、壁面積に対する孔の面積比、消波室の大きさなどによって影響される。

(ii) 円柱群による防波堤^{9), 10)}

円柱または円管を多数密集して打ち並べると、これらの杭群によって波の通過がさまたげられ防波堤の働きをする。この型の構造においては柱（または杭）の直径および配列の仕方が波のエネルギー吸収に大きく影響する。いま直径 D の円柱が間隔 b をもって一列に並んだ場合について考える。簡単のために柱列を通過して後方に伝わる波のエネルギーは柱と柱の間隔 b に比例するものと仮定すれば

$$P_T/P_I = b/(b+D)$$

P_I , P_T はそれぞれ入射波および透過波のエネルギーとする。また H_I , H_T をそれぞれ入射波および透過波の

に取る。ただし L は入射波の波長である。このような形の壁面によって、相隣る反射波の位相は半分だけ遅れることになり、したがってそれぞれの反射正面の前面には波向に直角方向の流れが発生し、これにより波のエネルギーが減殺される。さらに残存エネルギーによる反射の方向は港口に向うようになり、港内は影響を受けない。

3-5. その他

(i) 低反射率防波堤⁴⁴⁾

これは図-31に示すように中央の隔壁によって前後の2室に分割されたコンクリートケーソンよりなる防波堤である。前室は波のエネルギー吸収のための、後室はふつうのケーソンと同じく自重を与えるための室であって、その目的は入射波のエネルギーを正面の壁に多数設けられた孔を通して堤体内に吸収することにより、防波堤前面における重複波の波高減少をはかろうとするものである。これにより天端高の低い直立壁の場合の重複波による越波を防ぎ、また波圧を減少させることができる。この防波堤は数々の慎重な実験、研究を重ねた後に、現在 St. Lawrence 河に面したカナダの Com-eau 港⁴⁵⁾に延長約 300m に亘って施工され完成を見ている。

図-32はこの防波堤の特性を示す模型実験結果の1例である。図中に slotted wall とあるのは実験の便宜上個々の孔をあける代わりに、水平または垂直方向に細長いすき間を設けたものである。波のエネルギーは壁面の

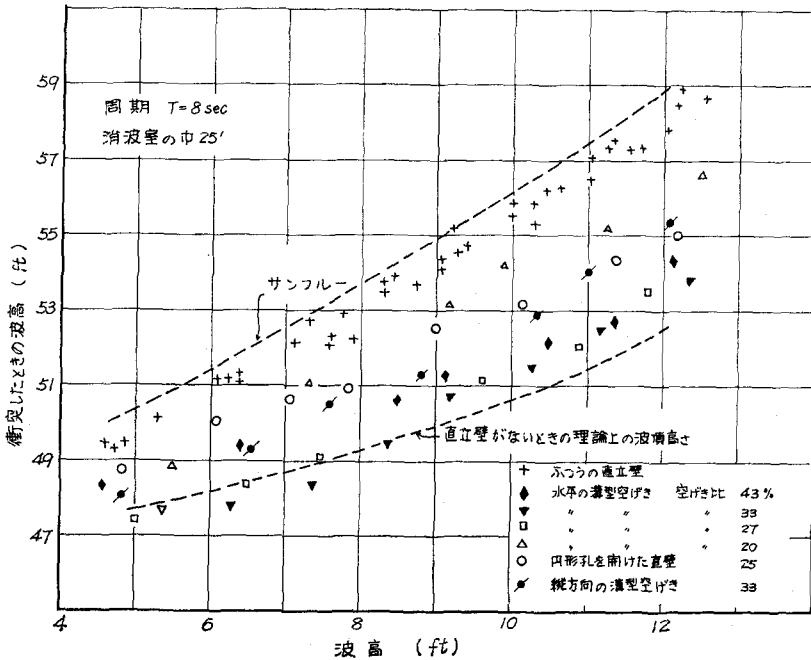


図-32

波高とすれば

$$H_T/H_I = \sqrt{P_T/P_I} = \sqrt{b/(b+D)}$$

この式によれば、例えば、柱と柱のすき間が 25cm に配列された直径 36cm の柱の列によっては透過波の波高は63%に減衰することになる。同じ柱をすき間 7.6cm に配列した場合には42%になり、3.8cm にしたときには31%となる。縮尺 1/12 の模型実験の結果では上記のそれぞれの場合について、83%, 53%, および 43% という減衰率が得られた。図-33は Costello による実験結果であって、3/8 吋の柱を図に示すように種々の形に配列した場合の波形こう配と、透過率との関係を示すものである。

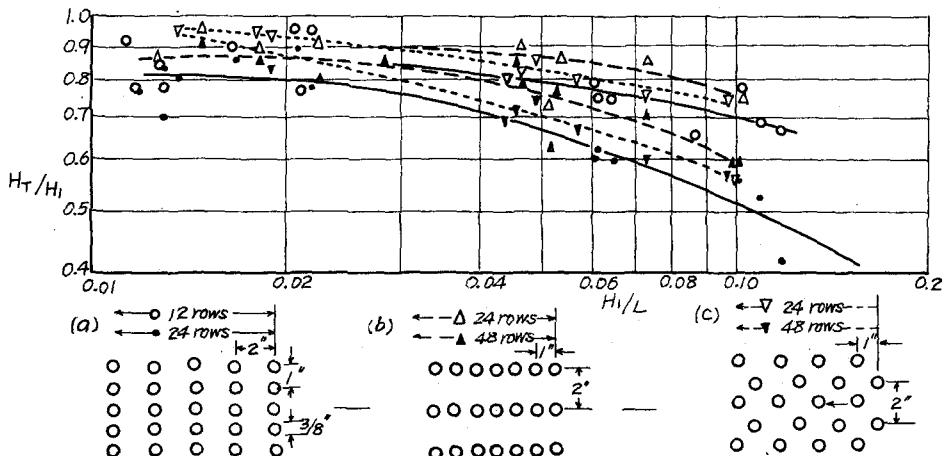


図-33

(iii) パイプ防波堤⁴⁶⁾

この防波堤（まだ実用の防波堤としての構造設計が示されているものではなく、その消波機構のみについての研究が行なわれている。）は多数のパイプを水平に束にして、波の進行方向と管軸を平行に置いたものである。消波の原理は、波がこのパイプ群の前面に到達すると波動運動がそこで中断され、水分子の軌道運動の上下方向成分は遮断され、水平方向成分は減速される。次いでパイプ内には流れが発生し、やがて後端からジェットとなって流出する。この流入流出および管内の摩擦損失によって波のエネルギーを減殺し消波効果を得ようとした試みである。MIT の Ippen の研究室において多数の実験が行なわれた⁴⁶⁾。消波効果はパイプの径、長さ（波長との

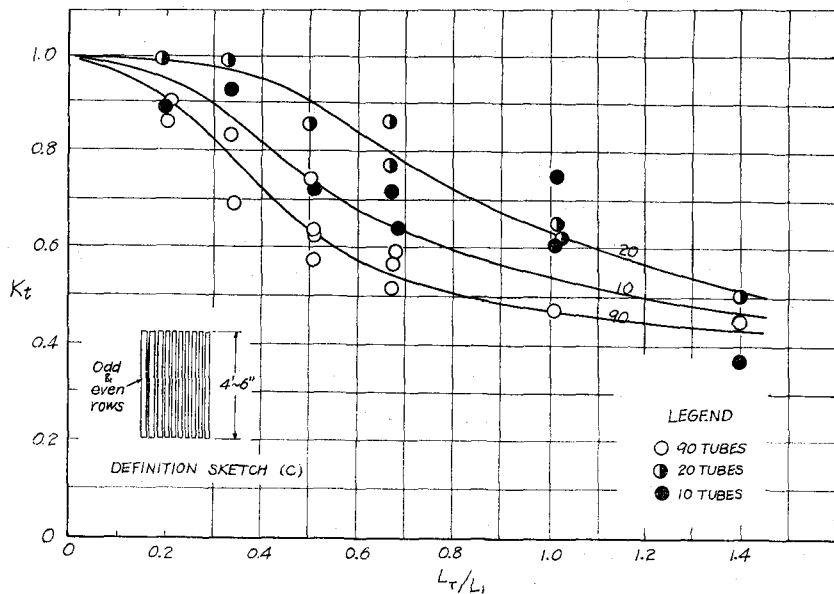


図 - 34

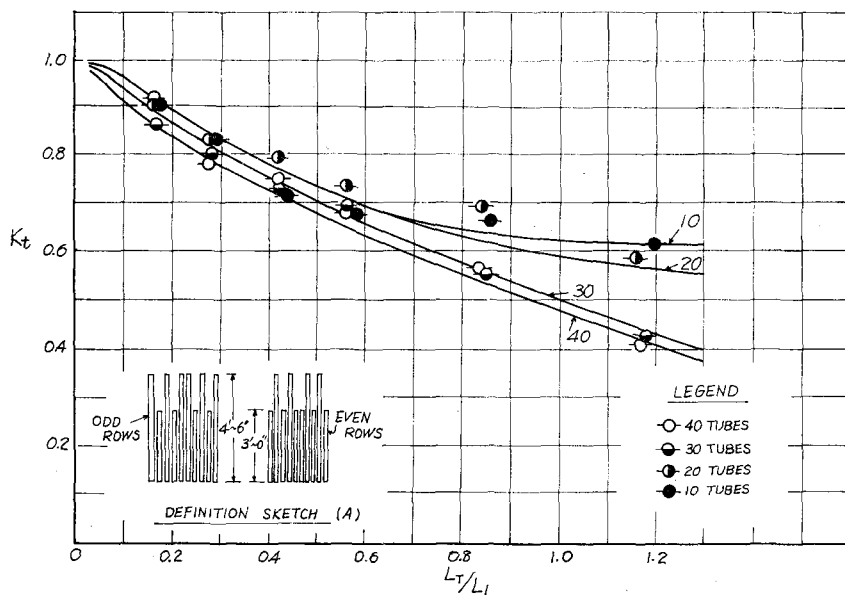


図 - 35

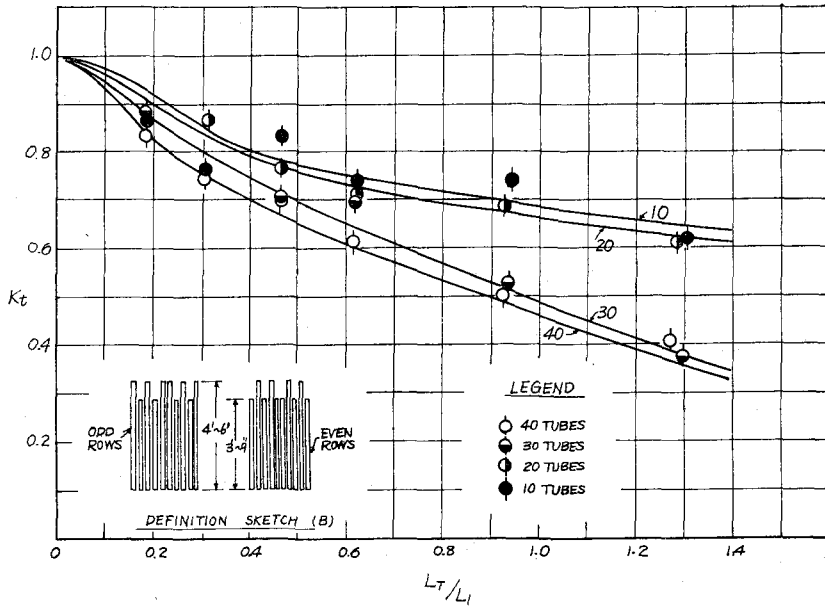


図 - 36

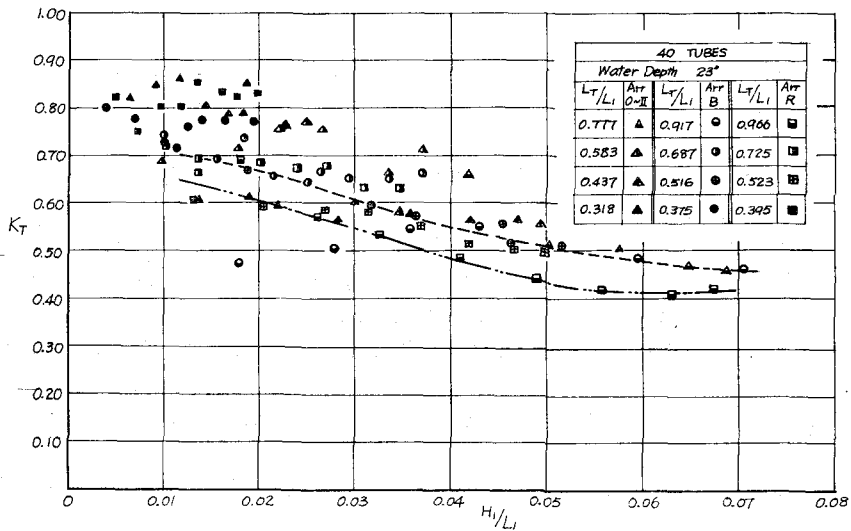


図 - 37

関係), 配列の方法, 波の性質などによって異なる。図 - 34, 35, 36, 37 はそれらの実験結果の一部である。

4. 結 語

以上 3 章にわたって消波構造に関し, いろいろ異なった面から考えてみた。消波構造というものは確かに存在していることは事実であるが, もうすでにそのような類別をされるような段階に達しているのかが先づ問題である。しかしそれを強いて分類し考察を加えてみたのが本稿である。

消波構造物を必要とする場合は港湾, 海岸関係の施設が増加し, 質の高度化が進むに伴ってますます多くなるであろう。それに対応すべく現在においてもこの小文で展望したような数々の例や, またこれら以外にもいる

いろ新しい考案や試みが行なわれている^{47),48),49)}。しかし、それらにはまだ開発途上にあるものが多く、実用化されるためにはさらに一層の研究が必要である。

消波機構の設計という問題についてみても現在のところでは一般的な方法が確立しておらず、個々の場合ごとに適当な方法がとられている状態である。多数の実験結果および実例が報告されているが、それらを整理してみるとまだ部分的な問題の単なる集合に過ぎず今後はさらに系統的に基本的な問題を究明する必要があると思う。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一, 土屋義人, 井上雅夫: 由比海岸堤防の越波に関する模型実験, 第10回海岸工学講演会講演集, 昭38.10, p. 132
- 2) 辰己寿男: 大分臨海工業地帯における埋立地の消波護岸の設計について, 第11回海岸工学講演会講演集, 昭39.
- 3) C. M. Snyder; Model Study of a Hydraulic Breakwater over a Reef, Proc. ASCE, WW1, March 1959.
- 4) R. L. Wiegel, H. W. Shen, & J. D. Cumming; Hovering Breakwater, Proc. ASCE. WW2, May 1962.
- 5) R. L. Wiegel; Floating Breakwater Survey to 15 August 1959, IER Tech. Rept. 140-2. H. E. L. Wave Research Project.
- 6) J. Valembois; Etude de l'Action d'Ouvrages Resonants sur la Propagation de la Houle, Minnesota International Hydraulic Convention, 1953.
- 7) J. Valembois et C. Birard; Les Ouvrages Resonants et leur Application a la Protection des Ports, Proc. 5th Conference on Coastal Eng, 1955, p. 637.
- 8) Per Drunn; Destruction of Wave Energy by Vertical Wall, Proc. ASCE. WW1, March 1956.
- 9) R. L. Wiegel; Closely Spaced Piles as a Breakwater, The Dock & Harbour Authority, Sept. 1961, p. 150.
- 10) R. D. Costello; Damping of Water Waves by Vertical Circular Cylinders, Trans. A.G.U., Vol. 33, No. 4, Aug. 1952.
- 11) Pierre Danel; Tetrapods, Proc. of 4th Conf. on Coastal Eng, Oct. 1953, p. 390.
- 12) Yves Mahé; Tetrapods in Coastal Protection Work, Proc. of. IAHR. 1953, London.
- 13) 土木学会文献調査委員会: 土木学会誌, 49巻, 第4号, p. 77.
- 14) Charles E. Lee; On the Design of Small Craft Harbors, Proc. of 9th Conf. on Coastal Eng., 1964.
- 15) Basil W. Wilson; A Case of Critical Surging of a Moored Ship, Proc. of ASCE, WW4, Dec. 1959.
- 16) 尾崎 晃, 柳沢満夫: 様似港の波浪について——港の形と静穏度との関係に関する研究—第1報—, 第9回海岸工学講演会講演集, 1962.
- 17) 尾崎 晃, 猿川 弦: 港内波浪の問題点について——港の形と静穏度との関係についての研究—第2報—, 第10回海岸工学講演会講演集, 昭38.
- 18) Ernest F. Brater; Methods of Correcting Wave Problems in Harbors, Proc. of ASCE, WW4 Dec. 1959. No. 2299.
- 19) 岩垣雄一, 石原安雄, 吉田幸三: 新堺港の波浪遮蔽実験, 京都大学防災研究所年報第5号, 昭36.
- 20) F. M. Abecasis; Resonance Condition in No. 1 Dock of Linanda Harbour, Proc. of 9th Conf. on Coastal Eng, 1964.
- 21) 尾崎 晃, 小野敏行, 宇田居吾一, 鴻上雄三: 留萌港模型実験, 北海道開発局土木試験所月報第127号, 昭39.1).

- 22) 運輸省第三港湾建設局：第6420号台風に関する調査，昭40.4.
- 23) Charles E. Lee; Small-Craft Harbor Problems, Proc. of ASCE, WW3, Aug. 1964.
- 24) 永井莊七郎，上田伸三：風と波を考慮した海岸堤防の形状と構造に関する研究，第7回海岸工学講演会講演集.
- 25) 第三港湾建設局：第二室戸台風による港湾災害調査報告書，昭37.3.
- 26) J. A. Putnum & J. W. Johnson; The Dissipation of Wave Energy by Bottom Friction, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 1, Feb. 1949.
- 27) John J. Healy; Wave Damping Effect of Beaches, IAHR, Minnesota International Hydraulic Convention, 1953.
- 28) J. A. Putnum; Loss of Wave Energy due to Percolation in a Permeable Sea Bottom, Trans. A.G.U., Vol. 30, No. 3., June. 1949.
- 29) L. Greslou et Y Mahé; Etude du Coefficient de Reflexion d'une Houle sur un Obstacle Constitue par un Plan Incliné, Proc. of 5th Conf. on Coastal Eng., 1955.
- 30) 岩垣雄一，柿沼忠男：浅海における波浪スペクトルの変形と海底摩擦係数の推定について，京都大学防災研究所年報第8号，昭40.
- 31) L. G. Straub, C. E. Bowers & J. B. Herbrich; Laboratory Tests of Permeable Wave Absorbers, Proc of 6th Conf. on Coastal Eng., 1958.
- 32) 岩垣雄一：海岸堤防論，水工学シリーズ，No. 64—08 土木学会水理委員会.
- 33) S. Nagai; Stable Concrete Blocks on Rubble-Mound Breakwaters, Proc. ASCE., WW3, Aug. 1962.
- 34) 白石直文，遠藤泰司：消波工に関する二，三の問題，第10回海岸工学講演会講演集，昭38.
- 35) 田中 茂，杉本修一：中空三角および中空三脚ブロックの安定および消波効果に関する実験的研究，第11回海岸工学講演会講演集，昭39.
- 36) 永井莊七郎：消波用中空ブロックに関する研究，第6回海岸工学講演会講演集，昭34.
- 37) S. Nagai; Experimental Studies of Specially Shaped Concrete Blocks for Absorbing Wave Energy, Proc. of 7th Conf. on Coastal Eng., 1961.
- 38) 永井莊七郎，高田 彰：海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果，第11回海岸工学講演会講演集，昭39.
- 39) 尾崎 晃，佐藤幸雄，戸沢哲夫：海岸堤防のり面構造と波のうち上げ高さとの関係(Ⅱ)，第11回海岸工学講演会講演集，昭39.
- 40) 古能浩三，鴻上雄三，近藤俊郎：テトラポッド防波堤に関する実験的研究，第8回海岸工学講演会講演集，昭36.
- 41) 本間 仁，堀川清司，長谷直樹：護岸に働らく波力について，第9回海岸工学講演会講演集，昭37.
- 42) 本間 仁，堀川清司，安川 浩：海岸護岸の実験的研究，第7回海岸工学講演会講演集，昭35.
- 43) 永井莊七郎，久保弘一，玉井佐一，上田伸三：防波堤および海岸堤防前面におかれた消波ブロックの効果について，第8回海岸工学講演会講演集，昭36.
- 44) Richard Boivin; Comments on Vertical Breakwater with Low Coefficients of Reflection, The Dock & Harbour Authority, Vol. XLV, No. 524, Jun. 1964.
- 45) Gaétan J. Côté & Guy R. Simard; The Breakwater Quay at the Bay of Comeau, The Dock & Harbour Authority, Vol. XLIV, No. 522, Apr. 1964.
- 46) A. T. Ippen and E. L. Bourodimos; Breakwater Characteristics of Open-tube System, Hydrodynamics Laboratory, Dep. of Civil Eng., MIT., Report No. 73, July. 1964.
- 47) R. L. Wiegel; Oceanographical Engineering, Prentice Hall, International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1964.
- 48) J. D. Lawson & C. E. Kirkham; Model Studies of Wave Absorbing Devices, The Dock & Harbour Authority, Vol. XLV, No. 527, Sept. 1964.

- 49) R. L. Wiegel; Transmission of Waves Past a Rigid Vertical Thin Barrier, Proc. ASCE, WW. 1, Mar. 1960.