

新構造防波堤とその設計

New Caisson Breakwaters and Their Designing

高橋重雄

Shigeo TAKAHASHI

1. まえがき

防波堤の歴史は、大水深・高波浪域へのたゆまない挑戦の歴史であり（伊藤1969）、いいかえれば新構造への挑戦の歴史でもある。図-1は、現在我が国の大水深域の防波堤として主流となっている混成防波堤の断面図である。この混成堤は、大型のケーソンを用いることによって大水深・高波浪域でも安定性が高い構造であるが、こうしたケーソン式混成堤は今世紀はじめの新構造防波堤である。

近年の新構造の開発は、Jarlan(1961)が直立消波ケーソンを提案したことが契機となっているように思われる。我が国でも1972年に高松港で直立消波ケーソンによる防波堤が作られるようになっており、1970年代から、大学や政府機関、あるいは民間会社等で多くの新構造の開発が行われ、室内実験や現地実証実験等が行われている（谷本1990）。ただし、新構造防波堤の開発は、さらなる大水深・高波浪域の防波堤をめざしたものでなく、軟弱地盤の防波堤をめざしたものもあり、また周辺環境に優しい防波堤の開発という、新しい技術を求めたものもあった。これらは、主としてケーソンの改良による新構造防波堤であり、これまでに多くの構造が開発されており、既に建設されたものも少なくない（高橋・下迫1996、沿岸センター1994）。

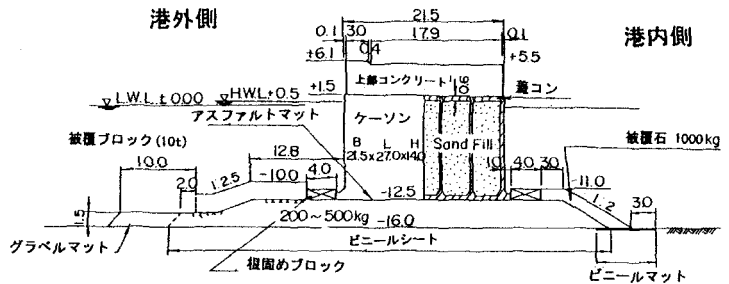


図-1 ケーソン式防波堤（片岡ら1986）

近年、土木施設の建設コストの削減が社会的に大きく取り上げられているが、防波堤についても新構造の採用によるコストの低減が模索されている。こうした社会的要請に応えるためには、これまでの開発成果を適切に利用する必要がある。本テキストは特に利用（構造を選択して設計）する側の立場をふまえて、これまでの新構造防波堤の技術をまとめようとしたものである。また、さらなる開発への努力も求められており、そのためにもこれまでの技術の整理が不可欠と思われる。

新構造防波堤のアイデアは実に多様であり、それらをうまく整理・分類することは不可能にも思えるが、表-1は、整理して説明するために、その主たる開発の目的から分類を試みたものである。このように数多くの新構造があり、かつそれぞれの構造もいくつかの種類があるが、本テキストは、既に述べたように防波

表-1 新構造防波堤の分類

開発の目的	構造
反射波低減 耐波安定性の向上 波力の低減、端趾圧の軽減 越波（伝達波）低減 海水交換促進 材料・施工の改良	直立消波構造、ブロック内蔵型 低天端、上部斜面、半没水斜面、上部消波構造、台形、幅広フチソク 半円形、消波型高基混成堤、軟着堤、ｼﾞｬｯｸﾄﾞ式、長大型 上部消波構造 透過型、造流型 ハイリッドケーソン、ﾊﾞｰﾈﾙｼｽﾃﾑ、海上接合

堤を設計する人々などを対象に、それぞれの新構造防波堤の特徴を理解していただくために私見をまとめたものである。

本テキストでは、表-1の分類に従い、まず第2章では反射波低減の直立消波構造について説明する。直立消波ケーソンを中心に、その消波機能や耐波設計法について注目すべき点を説明する。直立消波ケーソンは、既に述べたようにその後の新構造の開発のきっかけとなっており、新構造に共通する特徴や問題点が少なくない。第3章では、低天端構造が波力低減の基本となっていることを説明し、低天端で伝達波を抑えるいくつかの構造を説明する。また、いくつかの耐波安定性の高い他の構造についても説明する。第4章では、越波低減の構造について簡単な説明を加える。第5章では、海水交換型防波堤を分類してそれらの問題点等を検討する。

2. 反射波を低減する直立消波構造等

2.1 直立消波構造の形状と消波機能

直立消波ケーソンは透過壁から発生する渦によってエネルギーを消費する

直立消波ケーソンは、図-2に示すように透過壁と遊水室(中空の室)を持つケーソンである。直立消波ケーソンでは、透過壁前後の(ケーソン前面と遊水室内との)水位差が大きくそこでの流れが早いほど消波性能が高い。これは、透過壁での流れの急縮・急拡(による渦)によってエネルギーが消費されるためである。したがって、遊水室内

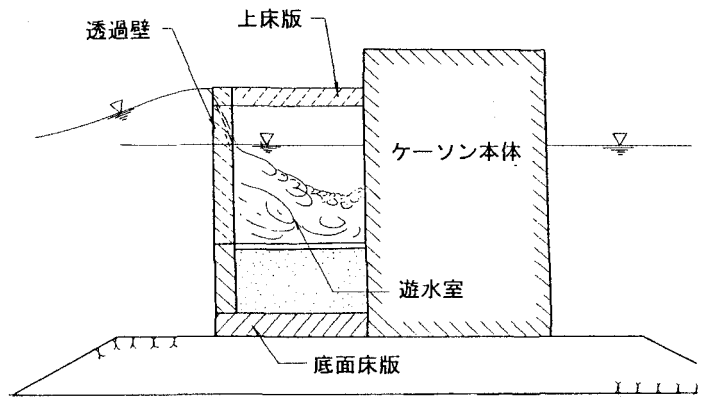


図-2 直立消波ケーソンの概要図

の水位変動が大きくそして前面と位相差が大きいほど消波性能が高くなり、遊水室幅 b と波長 L との比を適切にして遊水室内の波の運動を一種の共鳴振動状態にする必要がある。また、透過壁の開口率 ϵ が急縮・急拡の程度を決めており、共鳴状態とエネルギー減衰に深く関連している。図-3は反射率 K_R の一例(谷本・吉本1982)であり、この図のように一般には遊水室幅が波長の10~20%程度で反射率が低くなる。また、開口率は通常10~30%が良いとされているが、大きすぎると効果が無くなる。

直立消波ケーソンに求められる反射率は低いほど良いが、一般には40%以下を目途とする場合が多い。40%は高いようであるが、エネルギー的には波高の2乗であるため16%のエネルギーを反射し、84%を消費していることになり、

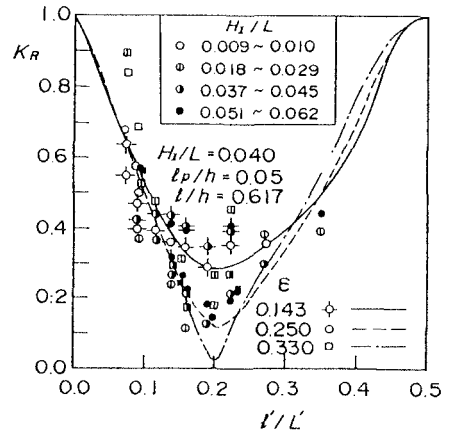


図-3 直立消波ケーソンの反射率

り、防波堤から少し離れれば反射波の影響は少ない。なお、遊水室は幅が狭いほど経済的であり、一般的には波長の13%程度を採るようである。また、遊水室の設計対象となる波浪条件は、必ずしも再現期間50年の設計波ではなく、たとえば前面を通行する船舶に問題となる波浪条件などを選択することが多い。

なお、初期の直立消波ケーソンでは、遊水室の深さ d' は前面水深 h' とほぼ同じであったが、最近では、ケーソンの重量を稼いだりするために、遊水室を浅くしてその下を砂等で中詰めしている場合がある。 d' を浅くすると、そこでの波長が短くなるため、やや遊水室幅を狭くしても良いが、透過壁の開口率を大きくしなければならない。直立消波構造の反射率については、多くの研究がなされており、計算もできるようになっている（堀口ら1980、谷本・吉本1982、近藤ら1983、萩原ら1984、小島ら1986、角野ら1989）。

消波部の形状が変わっても消波能力の差はそれほど大きくはない

透過壁や遊水室の構造は多様であり、また、全体的な形状によっても多くの形状が提案されている。例えば、透過壁としては、**縦スリット壁**（縦のスリット状の開口を持つ壁）が代表的なものであるが、**横スリット壁**や**円形の穴開き壁**などがある。また、二重のスリット壁を持つものや遊水室を斜面にしたもの、さらにはスリット壁に小段を設けたものなどもある。

こうした構造による消波性能の差は確かに認められるが、大きく見れば、その差は少ないといえよう。もちろん、たとえばスリット壁が円柱列などでできていれば、抵抗が少ないため波は入りやすく、平板によるスリット壁に比べその分開口率が大きくしたと同じ効果がある。また、透過壁が厚くなれば、逆に開口率を小さくした効果がある。また、**二重スリット**にすると消波性能がよい周波数帯が広がるといわれている。

斜め入射波の場合でも反射率の差は小さい

縦スリット壁による直立消波ケーソンを沖側から見ると、かなり斜めであると開口が見えなくなる。したがって、斜めからも開口が見える横スリット壁の方が、斜め入射波に対しては波が入りやすくよいという意見がある。しかしながら、こうした違いも先に述べた見かけ上の開口率の違い程度で、その差は小さいと思われる。また斜め入射波であれば、法線直角方向の波長が見かけ上短くなり、消波性能が高い波の周期が長い方に移行すると考えられる（中野ら1982、谷本・吉本1984）。

なお、斜め入射波の場合の防波堤に入射するエネルギー（単位長さあたり、波パワーともいう）は波高を H 、群速度 C_g 、水の単位体積重量を w 、入射角を θ として、 $0.125 w \cdot H^2 \cdot C_g \cdot \cos \theta$ であり、斜め入射ほど小さくなる。したがって、同じ反射率であっても、消費されるエネルギーは小さくなることに注意が必要である。たとえば、実験などで入射角が 90° に近づくと消波ケーソンでのエネルギー消費はかなり少なくなったように観察されるが、これはケーソンに入射するエネルギー自体がかなり小さくなったためであり、結果的に反射率としてはそれほど大きくはなっていない。

2.2 直立消波構造の耐波設計

新構造の耐波設計の基本は位相別設計と部材設計

通常のケーソン防波堤に作用する波力は、波の峰が直立部前面にある時を対象に設計される。しかしながら、直立消波ケーソンは複雑な形状をしており、必ずしも、波の峰が前面にあるときにケーソンの滑動や転倒が発生するわけでもなく、また各部材の設計でも、その一つの位相に対する設計だけでは不十分である。すなわち、直立消波ケーソンなどの新構造防波堤の設計では、いくつかの代表的な位相に対して波力を算定し、最も厳しい波力に対して、各部材を設計し、全体の安定性を検討する必要がある。こうした位相を考慮した設計（**位相別設計**）、そして全体の安定性だけでなく各部材の設計（**部材設計**）が重要となるのは、新構造防波堤の設計の特徴である（高橋・下迫1991）。

直立消波ケーソンにおける6つの代表的な位相

図-4は、直立消波ケーソンの耐波設計で考える代表的な位相を示すものである。すなわち、押し波時Ⅰ、押し波時Ⅱa、押し波時Ⅱb、引き波時Ⅰ、引き波時Ⅱ、引き波時Ⅲの6つの位相を考える必要がある。

押し波時Ⅰ：前面壁(透過壁および下部不透過前面壁)に働く波力が正のピークとなる位相

押し波時Ⅱa：遊水室後壁に働く波力が衝撃的ピークとなる位相。この位相は、波力が衝撃的でない場合には必ずしも明確ではない。

押し波時Ⅱb：遊水室後壁に働く波力が、衝撃的ピークに続く緩やかなピークに到達する位相

引き波時Ⅰ：前面壁に働く波力が負のピークとなる位相

引き波時Ⅱ：ケーソン前面水位がもっとも低下する位相

引き波時Ⅲ：遊水室内の水位がもっとも低下する位相

波力がそれほど厳しくない場合、滑動や転倒に関する波力は通常押し波時Ⅱbでピークとなる。ただし、衝撃砕波が作用するような高波浪海域における防波堤として直立消波ケーソンが用いられる場合は、滑動や転倒に関する波力は必ずしも押し波時Ⅱbでピークとなるとは限らない。

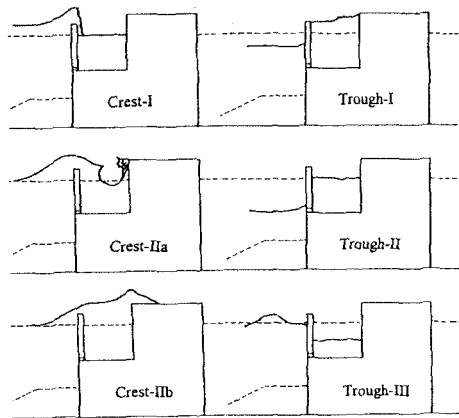


図-4 直立消波ケーソンの代表的な位相

波圧分布は合田式を準用し補正係数で評価する

通常のケーソンの設計は、波力の特性を的確に表すことができる合田波圧公式(1973)を使うことが一般的であり、直立消波ケーソンの設計においても、これを用いることが適当と考えられる。ただし、透過壁などによって波圧は変化しており、また位相によっても異なるため、これを波圧補正係数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 で補正する必要がある。すなわち、波圧の作用高さ η^* 、静水面での水平波圧強度 p_1 、そして揚圧力の強度 p_u は以下の式で表される。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \theta) \lambda_1 H_D \quad (1)$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \theta) (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \theta) w_0 H_D \quad (2)$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos \theta) \lambda_3 \alpha_3 w_0 H_D \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \{ (4\pi h/L_D) / \sinh(4\pi h/L_D) \}^2 \quad (4)$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_2, \alpha_1\} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \min\{ (1 - d/h_0)(H_D/d)^2/3, 2d/H_D \} \quad (6)$$

また、

θ ：波の入射方向と防波堤壁面に対する垂線のなす角

H_D, L_D ：設計波力の計算に用いる波高および波長

α_1 ：衝撃砕波係数

w_0 ：水の単位体積重量(= $\rho \cdot g$)

d ：マウンド上の水深

h ：防波堤の設置水深

h_0 ：防波堤の壁面から $5H_D/3$ 沖側の地点の水深

$\min\{a, b\}$ ：aまたはbいずれか小さい方の値

$\max\{a, b\}$ ：aまたはbいずれか大きい方の値

図-5 波圧分布と波圧補正係数

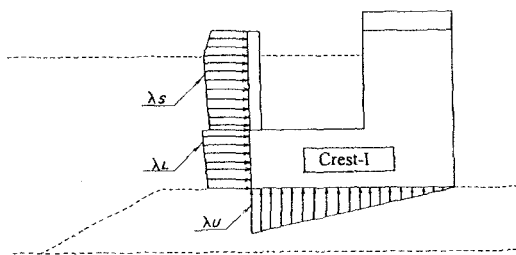


図-5 波圧分布と波圧補正係数

なお、 α_1 は重複波的な波圧成分によるものであり、 λ_1 もそうした波力成分に関する補正係数である。一方 α_2 は砕波による波圧成分であり、 λ_2 も砕波圧の補正係数である。さらに砕波係数 α_1 はマウンドによる衝撃的な砕波をよりの確に表すために導入された係数(高橋ら1992)であり、砕波圧としては α_2 と α_1 のどちらか大きい方でまゐる。

こうした波圧の補正係数は、各位相で異なるばかりでなく、各部材でも変わってくることに注意が必要である。こうした補正係数は、実験結果などから決められるが、代表的なものについてはすでに与えられている（高橋・下迫1991）。図-5は透過壁前面に波の峰があるとき（位相I）の設計波圧分布を示しているが、各壁の波圧をそれぞれの場所の波圧補正係数で補正することを示している。たとえば、は透過壁に作用する波圧は透過構造によって小さくなると考えて λ_{s1} を0.85とし、 λ_{s2} もかなり小さくするとしている。

なお、負の波圧については、水位が下がったときのそれぞれの部材位置での水位を設定して求める方法が考えられている。

直立消波ケーソンは通常のケーソンより滑動安定性が高い

直立消波ケーソンに作用する波力は、通常のケーソンに作用する波力よりも一般に小さいと考えられている。すなわち、

①透過壁の効果：

スリットなどの透過壁によってここに流れができ圧力が低下する（流速による圧力低下効果）。

また当然受圧面が開口率分だけ少なくなることによって、波圧合力が小さくなる（受圧面の減少効果）。

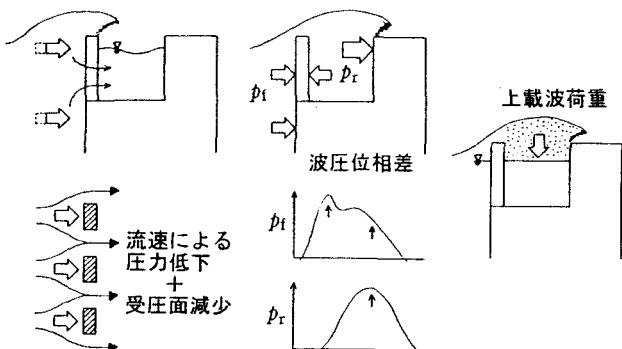


図-6 耐波安定性の向上の要因（直立消波構造）

②波圧位相差の効果：

たとえば遊水室後壁で波圧がピークとなるときには、透過壁ではピークではないなど、部材の位置によって波力のピークの位相がずれるため、結果として波力合力が小さくなる。

③上載波荷重の効果：

例えば、遊水室後壁で波圧がピークとなるときには、遊水室内では静水面より高い水位となって波の重量が遊水室の底版に作用することになる。こうした荷重（上載波荷重）は、ケーソンの滑動安定性を高めることに寄与する。

一般に直立消波ケーソンは、滑動に抵抗するために必要な重量を0～20%低減でき、遊水室があることによって重量を確保できない点のある程度補うことができる。

なお、これらは他の新構造にも多かれ少なかれある効果であり、これらの効果を最大限に利用すれば安定性の高い構造が得られる。図-6は、上述した耐波安定性向上に寄与する要因を説明するものである。

大水深・高波浪海域への直立消波ケーソンの適用には注意が必要

直立消波ケーソンは、これまで比較的波浪が穏やかな内湾域の防波堤として用いられてきた。しかしながら今後は、水深が大きい場合で低反射を要求される場合は、高波浪海域であっても消波ケーソンが用いられるようになると思われる。

表-2は、透過壁（スリット壁）に荷重が作用したときの必要な鉄筋コンクリート部材の必要な厚さの概算値（片もち梁としての概算値）を示すものである。波力が小さい場合は、比較的薄い厚さ（断面）でも問題は無いが、波力が大きくなるほど、そしてスリット壁が高くなるほどかなり厚い壁が必要となるのがわかる。すなわち、これは大水深・高波浪域にスリットケーソンを用いると、スリットの部材設計が問題となることを意味している。

もちろん、壁を厚くすることで一応対応できるが、コンクリートの温度応力によるひび割れや、遊水室が大きくなることなどの問題点がある。この対策の一つとして考えられるのは、スリット壁を支える梁や上床

版、隔壁を設けることであるが、ここに作用する波力が無視できない。あるいは、鉄筋の代わりに鉄骨などを用いることも考えられている。いずれにしてもこうした点を十分考慮して設計を行う必要がある。

なお、**曲面スリットケーソン**（谷本ら1980、高橋ら1991）や**二重円筒ケーソン**（谷本・下迫1988、遠藤ら1992、高橋・下迫1992、田端ら1995）などは、大水深高波浪海域へ適用する直立消波ケーソンとして開発されたものであり、曲面部材の強さを利用しており、さらに強度的に必要な場合にはPC部材を用いる設計となっている。また**二重横スリットケーソン**（村田ら1982）

表-2 スリット壁に作用する波圧と部材厚

スリット柱高さ	H	m	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0	10.0	10.0
波圧強度	p	tf/m ²	1.0	5.0	10.0	20.0	1.0	5.0	10.0	20.0
鉄筋径	D	mm	D25	D35	D38	* D29	D35	* D35	* D38	* D38
スリット壁厚	h	cm	35.0	65.0	100.0	190.0	60.0	120.0	190.0	350.0

注)コンクリート設計基準強度は240(kgf/cm²)、鉄筋はSD345、5(本/m)(*印は10(本/m))とした。

は、防波堤法線方向だけでなく直角方向にも梁と柱を組み合わせた構造によって、強大な波力に対抗している。これ

らのケーソンについての説明は省略するが、既にいくつかの実績があり、二重円筒ケーソンは**景観面**からも評価されて紀伊長島港に建設されている。

打ち込み波力や遊水室後壁への衝撃波力に注意が必要

特に高波浪域での直立消波ケーソンの設計では、図-7に示すような打ち込み波力や砕波力などの衝撃的な波力が問題となる場合がある。打ち込み波力は、透過壁の天端をこえた水塊（波の頂部）が遊水室の後壁をたたくときに発生する衝撃的な波力である。透過壁の天端を比較的低くしたり、逆に遊水室後壁を高くするときに発生する打ち込み波力は大きい。また、水塊が遊水室を上から塞ぐように落下するとそこで閉じこめられた空気の圧縮による衝撃波力が発生することもある。こうした波力の発生を防いだり緩和するためには、遊水室後壁上の上部工を後退させて、遊水室後壁への直接的な作用を避けるなどの工夫が必要である。

一方、遊水室が比較的浅いときには、ここで砕波が発生する。この砕波によっても後壁に衝撃的な波力が作用することがある。こうした砕波の発生頻度を小さくするためには、L.W.L.から少なくとも耐波設計有義波高の1/2の深さが必要と思われる。ただし、こうした衝撃砕波力に対しては、後壁だけでなく中詰め砂なども抵抗として働くため、実際には壁の破壊の危険性は緩和されているが、できるだけその大きさと頻度を小さくするためには、ここでの深さを大きくとる必要がある。

上床版を設けると衝撃的な揚圧力が発生する

遊水室に蓋のような上床版を設けた場合には、この床版に非常に厳しい揚圧力が働くことがある。したがって、こうした上床版を設けることは極力さけることが望ましい。しかしながら、たとえば親水性防波堤では、遊水室上部を散策路として利用するため上床版を設けることがあり、適切にこの波力を評価する必要がある。

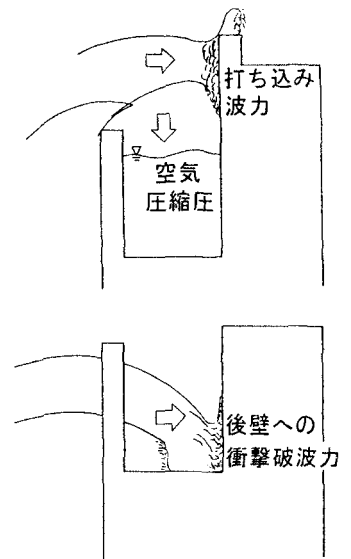


図-7 遊水室への打ち込み波力と後壁への砕波力

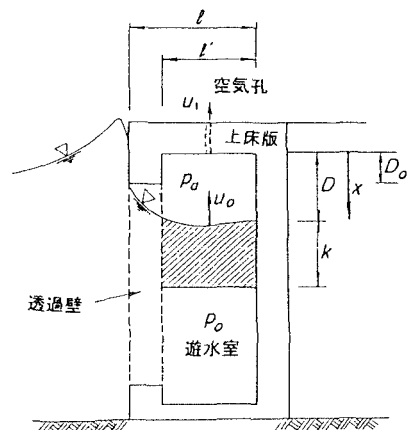


図-8 遊水室上床版への空気圧縮揚圧力

この圧力は、透過壁前面の水位が遊水室の天端（上床版の高さ）に達したとき、遊水室内に空気が閉じ込められ、それが上昇する遊水室内の水面によって圧縮されて生じる（図-8）。上床版に働く揚圧力は、水面の上昇速度 u_0 と閉じこめられた空気の厚さ D を用いて計算できる（高橋ら、1984）。垂水の埋め立て地に建設された縦スリットケーソンの場合、 $H_{1/3}=4.6\text{m}$ ($H_D=8.3\text{m}$)、 $T_{1/3}=8\text{s}$ の設計波に対して設計揚圧力は $2w_0H_D$ であった。模型実験では設計波に対する空気圧は $4w_0H_D$ 以上であったが、空気圧縮の縮尺効果を考慮すると、 $2w_0H_D$ 程度に減少することに注意する必要がある。空気圧縮圧力を水理模型実験で相似させるためには、大気圧を縮尺分だけ小さくしなければならず、実際には不可能であり、計算と比較して実験結果を補正する方法が用いられている。

2.3 施工上の問題点

新構造の設計は、施工を十分考慮して行う

直立消波ケーソンをはじめとする新構造は、一般に複雑な形状となるため、できるだけ施工がしやすいように設計段階から十分考慮する必要がある。また、施工方法によって設計が大きく変わることもある。たとえば、ケーソンを製作場所から防波堤設置位置までクレーン船で運ぶ場合には、釣り上げ時の強度で部材断面が決まることもある。一方浮遊させて曳航する場合には、浮遊時の水圧や波圧を考慮する必要がある。また、遊水室の浮力の確保の方法や遊水室の下部に中詰めする方法などをあらかじめ考慮しなければならない。

いずれにしても通常のケーソンの場合は、長年の経験と工夫によって非常に合理的な施工法が確立されてきており、新しい構造についてもそれに匹敵する施工に対する創意工夫が必要と思われる（吉江1995）。

2.4 その他の消波構造

低波浪域に適した直積み消波ブロックによる直立消波構造

図-9は、直積み（直立）消波ブロックの例を示すものであり、ブロックを積み重ねることによって直立消波構造を形成するものである。比較的低波浪の海域では、施工機械も小型のものですむことから大変有利な構造で、使用実績も多い（竹田ら1976、柳生ら1980）。消波機能についても遊水室幅と波長の比によって直立消波ケーソンと同様な反射率を得ることができる。

このような防波堤の設計にあたっては、模型実験を行うことが望ましいが、予備的な設計としては、補正係数 λ_1 および $\lambda_3=0.8\sim 1.0$ 、 $\lambda_2=0$ として、拡張された合田式の波圧分布を用いることができる。構成ブロックの安定性を検討する場合には、ブロック間の隙間に揚圧力が作用すると考え、その揚圧力を同じ高さの前面壁に働く水平波圧と同じであると仮定して行う。ただし、静水面より上にあるブロックや上部ブロックに働く揚圧力は非常に衝撃的であり、合田式による計算値の2～3倍の値となる可能性もあることに注意を要する。

異なる消波機構を持つブロック内蔵ケーソン

図-10は、ブロック内蔵型のケーソン（時川ら197

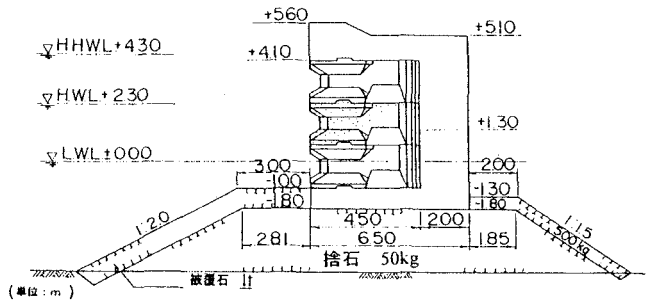


図-9 直積み消波ブロック（片岡ら1986）

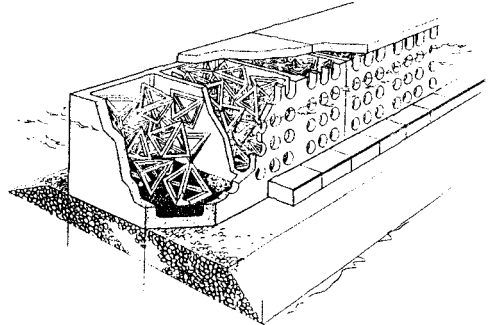


図-10 ブロック内蔵ケーソン

9) で、ケーソンをブロックを入れる枠として使ったものである。外見上は、直立消波ケーソンの遊水室にブロックを入れたものようであるが、前壁の透過壁の開口率は40%以上であり、ここでのエネルギー消費は少なく、その機構は大きく異なる。すなわち、内蔵ブロックによってできる渦によってエネルギー消費するものであり、前壁でのエネルギー消費を期待しないものである。直立消波ケーソンと比べると、ここにブロックがあることによって重量が稼げるが、ブロックが必要であることと、ブロックの動揺や散乱によるケーソン壁の破損対策が必要であることが指摘できる。こうしたブロック内蔵型のケーソンで大型のものとして、**双胴型ケーソン**（馬場ら1992）と呼ばれるものもある。

また、ブロック内蔵型のケーソンに少し似ているもので、ケーソンではなくL型ブロックを用いた、**L型消波堤**（輪湖ら1990）と呼ばれているものもある。傾斜堤の背後をL型ブロックで直立壁にしているが、底版上部の重量で安定性を確保している点が共通している。

3. 耐波安定性の高い構造

3.1 低天端堤

天端をかなり低くすることによって波力は低減する（これが新構造の波力低減の基本？）

図-11は、合田(1972)が合田波圧公式(1973)を提案するために行った水理模型実験結果の一つで、天端が静水面付近でごく低いときの波圧分布を示すものである。この図のように**低天端防波堤**であれば、静水面付近の波圧は低減する。もちろん、これは越波（というより越流）によって静水面付近で大きい流速が発生し、それによって、この付近の圧力が低下すると考えられる。中田ら（1984）は、低天端防波堤（暫定天端の防波堤）の一連の実験を行っており、天端高さとの有義波高の比 $h_c/H_{1/3}$ が0.1から0.35の範囲の結果から、以下の式を提案している。

$$\lambda_1 = 0.65 + h_c/H_{1/3}$$

$$(0.1 \leq h_c/H_{1/3} < 0.35) \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1$$

ここに、 λ_1 と λ_2 は、先に述べた合田式の補正係数であり、水平波圧（重複波圧と砕波圧成分）に対する補正係数である。中田らの結果では、揚圧力に対する補正係数 λ_3 にも同じ値を用いることになっているが、図-11でも明らかなように揚圧力は決して減少してなく、注意が必要である。さらに、低天端であれば受圧面が減るため、波圧合力は低減することはもちろんである。すなわち、低天端による波力低減効果には、

①受圧面の減少効果

②流速による圧力低下効果（静水面付近の波圧低減効果）

の二つがある。なお図-12に示すように、この二つと位相差による波力の低減効果そして上載波荷重が後に述べる各種の低天端構造の耐波安定性向上の要因となっていると思われる。ただし低天端堤では、静水面上

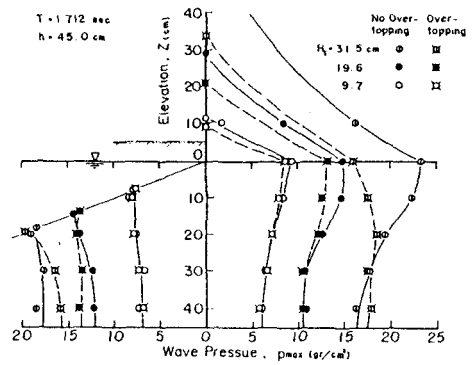


図-11 低天端堤の波圧分布

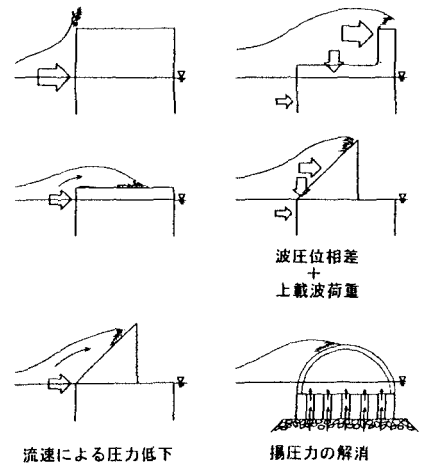


図-12 耐波安定性向上の要因
（低天端構造）

の浮力を受けない断面が小さくなるため、重量の確保の点でやや不利となる場合がある。

もちろん低天端では伝達波は高くなる

通常の防波堤は設計有義波高の0.6倍の天端高さを用いている。このときの波高伝達率 K_T は、0.1から0.2程度であるが、これが低天端で、例えば $h_c/H_{1/3} = 0.1$ では、0.3から0.4程度に上がってしまう。すなわち、新構造の開発では、低天端の波力低減効果があって、かつ伝達波が通常の防波堤と同程度となる構造の開発が目標の一つとなっている。

3.2 上部斜面堤および半没水上部斜面堤

上部斜面堤は耐波安定性の高い構造の代表である

上部斜面ケーソン堤は、静水面付近から天端が斜面となっている構造である。この構造は古くからあり、必ずしも新構造といえないかもしれないが、森平ら(1979)が通常の防波堤の改良として研究してから、この形式の防波堤が数多く建設されている(中田ら1983)。森平らの研究結果をまとめると、

- ① 上部斜面ケーソンは安定性の高い構造である。すなわち、
 - a) 斜面に作用する波によって大きな上載波荷重が期待でき、その結果堤体重量が増えたのと同じ効果となる。すなわち、通常の壁面に作用する水平波力の $\sin\alpha \cos\alpha$ (α : 斜面の角度) が下向きに作用する。
 - b) 斜面に作用する水平波力は、斜面角度によってできる流速の効果で減少する。すなわち、 $\sin^2\alpha$ に減少する。
- ② やはり伝達波は高くなるが、伝達率を通常の防波堤と同じにするには天端高さ h_c を $1.0H_{1/3}$ とすればよい。

上部斜面堤も低天端堤の一つ?

上部斜面ケーソンは、静水面付近から天端が斜面となっている構造であり、鉛直壁が静水面付近までしかないことから、低天端堤の一種と考えられる。すなわち、低天端堤の長所の波力低減効果をもち、欠点である波高伝達率が大きくなることを、斜面の天端をあげることによって対処しようとするものと考えることができる。結果として天端が高い防波堤であるので、低天端堤の一種と考えるのは矛盾があるが、その波力の発生機構からはこう考えるのが妥当であろう。

森平らの結果は、おおむねその耐波安定性の特徴を捉えているが、先に低天端堤の特徴として述べた「静水面付近の鉛直壁における波圧低減効果」については言及していない。

半没水上部斜面堤は、低天端の効果をも最大限に生かしたものの

図-13は、上部斜面堤の天端をさらに下げた半没水上部斜面堤とそれに作用する波力を示すものである。半没水上部斜面堤は、低天端の効果をもさらに強めており、特に「静水面付近の鉛直壁における波圧低減効果」も明確に認められるようになる。細山田ら(1994)は、通常の上部斜面堤をも含めて設計波力の検討を行っており、それらをまとめると以下ようになる。

① 斜面部に働く波力

斜面部に働く波力の水平成分 F_{SH} および鉛直下向き成分 F_{SV} はそれぞれ以下のように計算される。

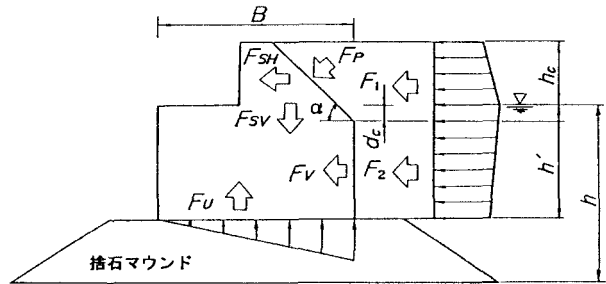


図-13 半没水上部斜面堤とそれに作用する波圧分布

3.3 上部工の改良（上部消波構造）と消波ブロックの被覆

上部斜面堤の上部工（斜面部）の改良による伝達波の低減

図-14は、佐藤ら（1992）が上部斜面ケーソンの上部工の改良の候補として検討した上部工（斜面部）形状を示すものである。いずれの断面でも、通常のような斜面に比べて伝達波の低減効果は大きい。ただし、形状によっては、その部材への波圧がかなり大きいことがわかった。図-14のなかで、斜面に縦のスリット状の開口部を設けたものが現地（那覇港）に採用されているが、天端 h を有義波高の1.0倍ではなく0.8倍に低減している。

なお、上部斜面の上部工の改良で最も特徴があるものは、マルチセルラーケーソン（谷本ら1981、小島ら1986）であり、斜面が凹上になって、かつ三段になっている。斜面の改良によって伝達波高が減少し、安定性がさらに向上しているが、やや形状が複雑で施工上の問題となっている。

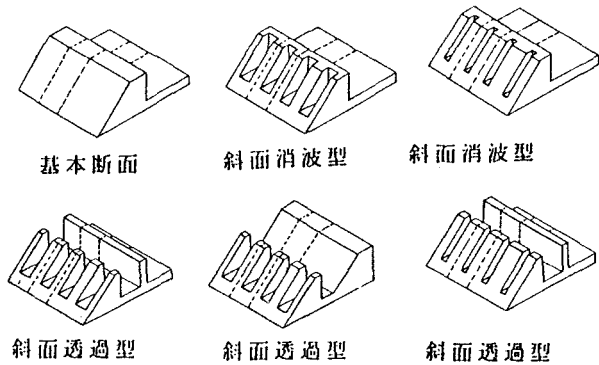


図-14 上部工斜面の改良

通常の低天端堤も上部工の改良によって波力低減効果を損なわず伝達波を低減できる可能性がある。

図-15は、後部パラペット式スポットリーフ堤（船越ら1994、松井ら1994）であり、上部工の形状を工夫したものである（上部消波構造）である。前面の天端をやや低くして、後部に通常の高さのパラペットを置いたものである。こうしたパラペット後退型は、波圧の位相差を考慮できる構造、すなわち前面に波の峰があるときには天端が低く受圧面が小さく、パラペットに波の峰があるときには、直立壁では波圧のピークの位相ではなく、波圧合力が小さい構造と考えられる。しかしながら、実際にはパラペットに強大な波力が作用するために問題とされていた（伊藤ら1966）。図-15の場合、スポットリーフを置くことによって波（の先端部）を砕き、パラペットに作用する波力を低減することができる構造となっている。ただし検討されている構造では、残念ながら上部工本体の天端をそれほど低くしていないために、静水面付近の波圧の低減効果が期待できない。また、受圧面の減少による波力合力の低減も顕著ではない。前面の天端をさらに下げると経済性の向上の可能性があるとと思われる。

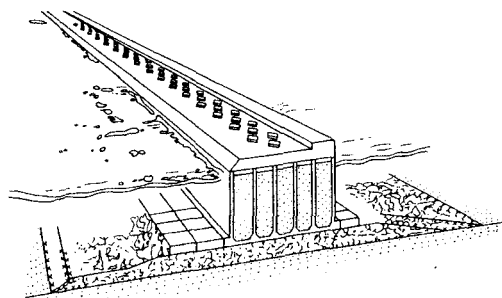


図-15 後部パラペット式スポットリーフ堤

低天端堤を消波ブロックで被覆した構造で

はブロックの削減がはかれる

通常のケーソン前面に消波ブロックを設置し、ブロックによる消波機能と波力低減を図った防波堤を、消波ブロック被覆（ケーソン）防波堤と呼んでいる。この形式も多くの実績があり、標準的な防波堤の一つとなっている。図-1

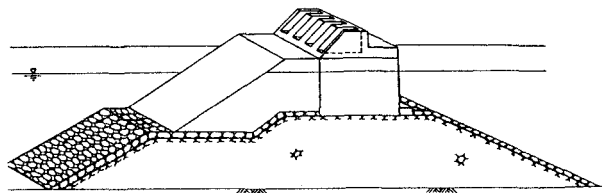


図-16 消波ブロック上部斜面堤

6は、那覇港に造られた消波ブロック被覆上部斜面堤（佐藤ら1992）であり、上部斜面堤の特徴を持つとも

に、消波機能を持つものである。この防波堤は、ブロック部（消波部）の天端が低いことによって、結果的にブロック部断面をかなり小さくできる長所があり、水深が深い場所で特に有利となる。もちろん、ブロックの断面が減ることによって消波性能が低下するが、通常の消波対象波についてはあまり問題とならない。ただし、静水面付近にあるブロックが動揺し易いことなどに注意が必要である。こうした特性は、低天端で消波ブロックで被覆された構造（消波ブロック被覆後部パラペットスポットリーフ堤等）すべてに共通である。

3.4 台形ケーソンと幅広フーチング（端趾圧の低減）

斜面の効果による波圧低減と台形形状による端趾圧の低減

台形ケーソンは伝統的なケーソン形状の一つで、通常の鉛直壁のケーソンよりも安定性の高い構造と考えられている。谷本・木村(1985)は台形ケーソンに関する一連の実験を行っており、図-17は実験により得られた台形ケーソンの波圧分布を示したものである。波圧は合田式により計算され、斜面に対して垂直に作用するものと仮定する。したがって、その鉛直成分は上載波荷重としてケーソンを安定化させる方向に働く。実験ではまた、斜面によって大きくなる上向きの水粒子速度の影響と位相差によって水平波力ピーク時のケーソン底面の揚圧力が減少することも明らかになった。合田式における揚圧力の補正係数 λ_s は以下のように表される。

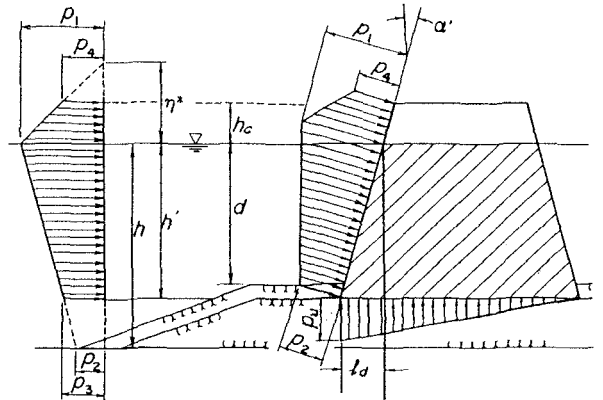


図-17 台形ケーソンに作用する波力

$$\lambda_s = \exp\{-2.26(7.2 l_a/L)^3\} \quad (14)$$

ここに、 $l_a = h' \tan \alpha'$ (α' : 前面壁の傾斜角)である。式(14)は、傾斜角が 20° 以下で、 $l_a < 0.1L$ の台形ケーソンに適用可能である。

台形ケーソンのもう一つの有利な点は、底版の幅が広いため、通常のケーソンに比べて端趾圧が小さくなることである。水深が大きくなると直立部が高くなり荷重の偏心によって端趾圧が大きくなるのが、大きな問題であったが、直立部に台形型のケーソンを用いることで端趾圧を減少させることができる。ただし、伝達波が大きくなるため通常の直立壁に比べ10~20%の天端の高さの割り増しが必要である。

なお、二重横スリット台形ケーソン（谷本ら1988、森ら1989）や上部斜面台形ケーソン（奥野ら1994）など台形ケーソンと組み合わせた構造もある。また、小名浜港ではケーソンヤードの大きさの関係から、大型の台形ケーソンを二つに分割して製作し海上で接合する工法（小島ら1992、和田ら1993）が採用されている。

幅広フーチングによる端趾圧の低減（合成版ケーソン）

台形ケーソンと同様な端趾圧低減効果は、フーチング部を広くとることによっても得ることができる。ただし、通常の鉄筋コンクリートでは、その強度からその長さに限度があり、合成版（鋼とコンクリートのハイブリッド）等を用いる場合が多い。こうした幅広フーチングでは、その部分の揚圧力と上面にかかる鉛直圧力が問題となるが、設計上は両者を見捨て、ケーソン部の揚圧力だけを考慮して設計しても良い。図-18に全体が合成

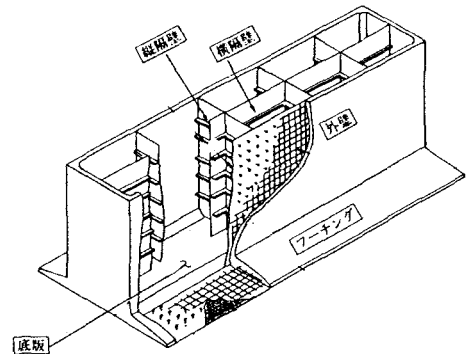


図-18 合成版ケーソン（幅広フーチング）

版でできたケーソン（沿岸開発技術研究センター1991）を示すが、底版部分のみを合成版とする場合もある。

なお、堤体重量の軽減や端趾圧の軽減など、基礎地盤に対する荷重を軽減することは、弱い地盤の改良にかかるコストを考えると、非常に重要であることをここで指摘しておきたい。

3.5 半円形ケーソン

半円形ケーソンによる波圧低減と端趾圧の低減＋底版の開口による揚圧力の解消

図-19に示す半円形ケーソン（谷本ら1989、山下ら1996）は、円筒の斜面による波圧低減（流速による圧力低下効果＋位相差の効果＋上載波荷重）を利用したもので、かつ円筒構造の強度を利用した構造（清宮ら1993）でもある。また、円筒面に波が作用するため波圧合力が偏心しないために端趾圧が大きくなることも利用している。さらに、底版に10%程度の穴をあけており、これによって揚圧力が抜け、ほとんどゼロとなる効果（底版の開口による揚圧力の解消）がある。したがって、半円形ケーソンは非常に軽く地盤への負担が少ない構造である。また、前面の斜面壁によって、砕波に対しても大きな衝撃的な波力になりにくい構造であり、砕波帯への適用が考えられている。なお、斜面による伝達波の増加を岸側の円筒部に穴を設けて円筒内に越波水を落下させることで抑制しており、天端高さも通常のケーソン程度で良い。

なお、P C部材でできている円筒部の施工方法など合理化すべき点もあるが、半円形ケーソンはこのように卓越したアイデアによる最も新構造らしいものの一つであり、早期に実用化が期待される。現在、水理模型実験、そして実証実験（宮崎港）をへて設計法が一応確立しており（沿岸開発技術研究センター1996）、合田式を基本に補正係数を用いて設計波力を算定できる。

3.6 消波型高基混成堤

発想の転換（高基混成堤の最大の敵「砕波」を利用する）

図-20は、内湾域の防波堤として開発が進んでいる消波型の高基混成堤（高橋ら1995）である。内湾域で比較的水深の浅いところでは、緩傾斜堤が環境面や越波低減効果から適用性が高いと考えられているが、断面が大きくなるため経済性に問題がある。高いマウンド上（L.W.L.以上）に直立部を設置した高基混成堤は、断面の縮小の効果が大きく有利であるが、高いマウンドで砕波し衝撃的な波力が発生するため危険な構造とされてきた。しかしながら、マウンド天端の幅をある程度とって波を砕波させた後に作用させ、かつ直立部を消波構造にすれば、さらに波を砕き波力を

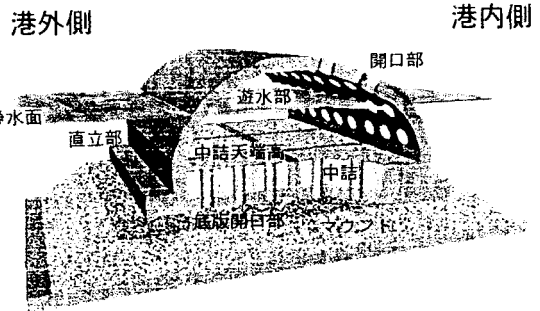


図-19 半円形ケーソン

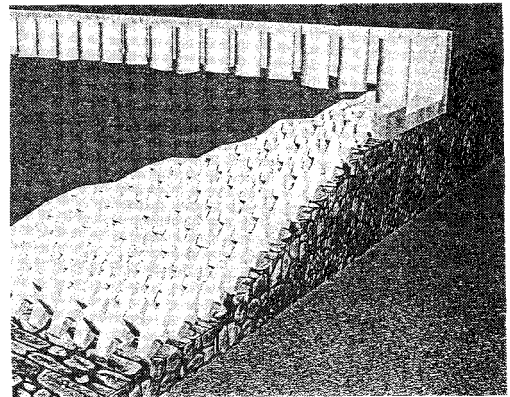


図-20 消波型高基混成堤

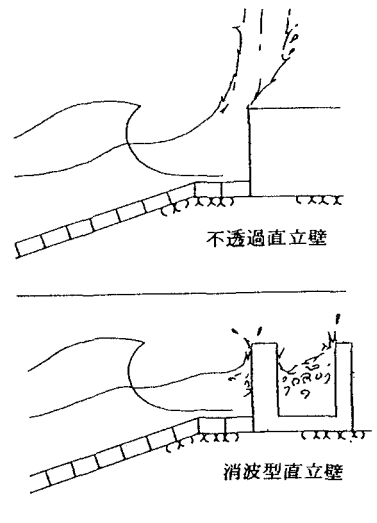


図-21 高基混成堤への波の作用

著しく低減できることがわかった（図-21、下迫ら1996）。

また、伝達波も緩傾斜堤よりさらに低減でき、マウンドを緩傾斜とすることによって、小さい断面でもさらに広い浅水域（浅場）を造り出すことができることもわかっている。さらに、断面が小さくなるため基礎地盤がある程度弱くても、地盤の改良が少なくすむという効果がある。なお、この基本的な特性についての研究は進んでおり、大型の実験も実施されている。

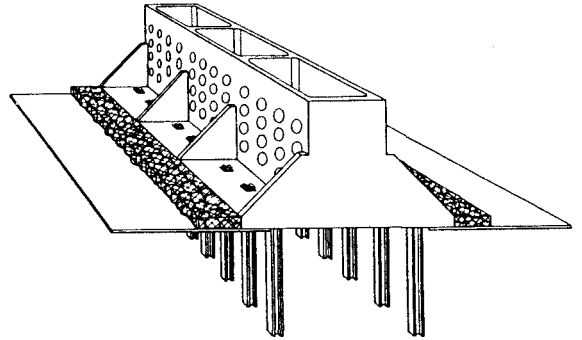


図-22 軟着堤

3.7 その他の耐波安定性の高い構造

軟弱な地盤にも建設できる構造

軟着堤（軟弱地盤着底式防波堤）（図-22）は、軟弱な粘土地盤上に防波堤を建設するために開発されたもので、熊本新港にすでに建設されている（木原ら1988、門司ら1989）。この構造は、堤体底面と粘土地盤表層の粘着力によって水平波力に抗するものであり、抵抗力が不足する場合は杭によって抵抗力を付加するものである。上部は直立消波構造となっており、直立消波構造の特徴も有する。設計波力は合田式を補正するものであり、揚圧力を考慮せず、また広い底版にかかる波力（上載波荷重）が安定性に寄与するとしている。対象とする波高は小さく、堤体も軽く造ることができるために軟弱な地盤でも地盤改良等が不要で経済的となっている。

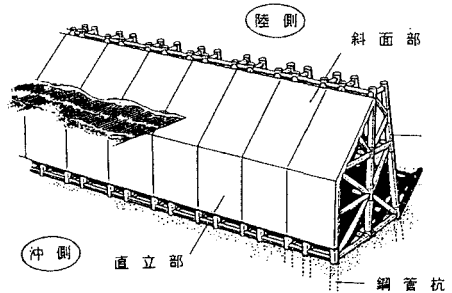


図-23 ジャケット式

材料の強度が利用できる構造（杭式+ジャケット式）

図-23は、鋼製のジャケット式の防波堤（大久保ら1993）で、半没水斜面構造でもある。鋼製ジャケットは、大きな力に対抗できる構造であり、杭支持であるために、軟弱な地盤に有効である。また、水深が大きい場合にもジャケットの強度と杭の反力によって対応が可能な構造である。

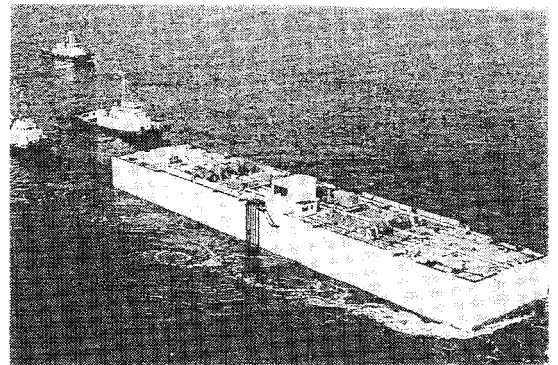


図-24 長大ケーソン（運輸省第三港湾建設局）

波力の平滑化と急速施工の長大ケーソン

図-24は、曳航中の長大ケーソンであり、通常のケーソンが法線方向に10~20m程度の長さであるのに対して、50~200mと長いケーソンである。高知新港に100mの長大ケーソンが設置されているが、このケーソンは仮設の防波堤として計画され、将来的には別の場所の防波堤として移設が計画されている。長大ケーソンの長所は、斜め入射波の場合の波力の平滑化効果（高橋ら1990）であり、ケーソンが長ければ波の峰だけでなく谷の部分も作用するというように波圧合力として低減（平滑化）する。ただし、ケーソンが平面的に回転することについても検討が必要である。長大ケーソンは、急速施工にも適しているが、マウンドの不陸や曳航中の波浪荷重に対しても検討が必要である。

4. 越波を低減するいくつかの構造

伝達波を低減する構造とほぼ同じ（上部消波構造など）

護岸などの場合は、伝達波でなく越波を低減することが問題となる。護岸の検討対象となる越波流量は $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度であり、防波堤の場合の越波流量に比べてかなり小さく、越波する様子も防波堤とかなり異なるが、護岸の越波量を抑制する構造と防波堤の伝達波を抑制する構造には基本的な差はない。

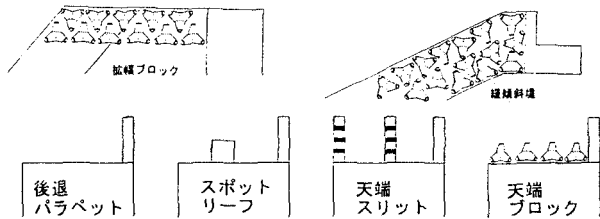


図-25 越波低減構造

越波低減構造についても既に多くの研究があり（合田ら1976、高山1982）、従来型の低越波構造としては、**パラベット後退型**があり、**ブロック天端拡幅型**の消波ブロック被覆堤あるいは**緩傾斜堤**もある。このほか天端に直立型の消波ブロックを置いた構造も関西電力の御坊発電所等で用いられている。これは、前に述べた低天端型防波堤の上部工を改良した**上部消波構造**の一つでもあり、スポットリーフやその代わりに消波ブロックを並べた構造でも越波低減効果がある。最近では、ブロックを置く代わりにスリット壁などを天端に設置することなども考えられている（図-25）。

なお先に述べた高基混成堤は、もともと越波を低減する低天端構造として開発されたものである（高橋ら1995）。高基混成堤では、透過壁と後壁の間の遊水室の部分が越波を**トラップ**するように働き越波量を低減している。また、波の作用は後壁に衝突して打ち上がるため、打ち上げは多いが後壁を越える越波量は少ない。なお、遊水室内にブロックを置き越波の勢いをさらに低減させることも試みたが、逆に越波量は増え、越波をとらえる「空の遊水室（空間）」が重要であることがわかった。また、後壁に小さな波返し工を付けるとその打ち上げ高さや越波量がかなり低減する。なお、大きな波返し工によって越波流量を低減する新しい構造の研究（村上ら1996）も進められている。ただし、波返し工が効果的なのは、打ち上げるように波が作用した場合であり、緩傾斜堤のように斜面を遡上する流れのような場合にはその効果は小さい。また波返し工が大きい場合には、これによる波力の増大についても注意が必要である。

5. 海水交換防波堤

表-3 海水交換型防波堤の分類

海水交換防波堤は透過堤と造流堤の二つの構造に分類できる

海水交換型防波堤と呼ばれるものにはいくつかの種類があるが、表-3のように、**透過型**と**造流型**とに分けられる。透過型でも**開放型**と呼ばれるものはその防波堤の存在がこれまでの海水交換の阻害とはほとんどならない構造であるが、**空隙型**や**有孔型**の透過堤は、海水交換能力はそれほど高くない。これに対して、波から流れを積極的に造りだそうとするものが**造流型**であり、海水交換型としては有望であるが、さらに開発が必要である。

透過堤	空隙型	捨石堤 ブロック堤
	有孔型	ケーソン目地間隙型 穴あきケーソン
	開放型	浮防波堤 カーテン防波堤 潜堤 (フラップボード) (液状化消波システム) 水平板
造流堤	弁型	
	越流型	潜堤付き防波堤 半円形ケーソン

5.1 透過堤

普通の防波堤も透過堤？（空隙型透過堤）

通常のケーソン式防波堤も、マウンドの捨石の空隙を通して波が入り出ており、数%の波高伝達率があり、長周期の波の透過は条件によって大きく異なるが10%から30%程度と無視できない透過性がある。また、捨石マウンド堤（傾斜堤）、特に異形コンクリートブロックによる防波堤（離岸堤）は、大きな空隙を持つため潮流などの流れだけでなく、一波一波の波による海水交換が期待できる。ただし、一波一波の波による海水交換は、防波堤の近傍に限られるようである。

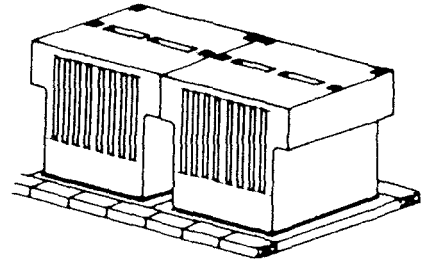


図-26 通水口を持つ消波ケーソン（呼子港）

有孔型の通水口での海水交換には限度がある？

図-26は、呼子港の直立消波ケーソン防波堤である。この防波堤は、ケーソンの側面に開口部（通水口）を設けて海水交換を期待するものである。こうした工法は比較的古くから行われており、1970年ころに須磨港や新宮港でケーソンとケーソンの間隔をあけるとい

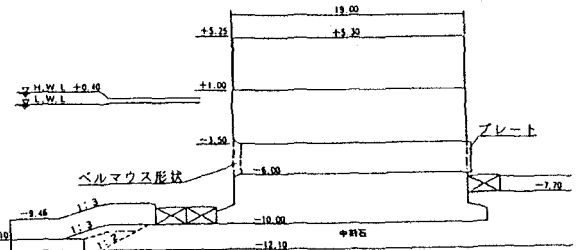


図-27 通水口を持つ通常のケーソン（瀬棚港）

ンとケーソンの間隔をあけるといいう形（狭間防波堤、高1972）で実際に施工されている。直立消波ケーソンは、透過壁や遊水室を持っており、ケーソン形状をさらに変えることが比較的簡単であるため、図-26のほかにも種々のケーソン構造が考えられており、鹿児島港や三田尻港防波堤のようにケーソン下部に通水口を設けたものもある。また、小野田港の防波堤のように三重の透過壁からなるものもある。さらに前述の二重円筒ケーソン堤でも、外円筒の港内側下部に穴をあけて海水交換を図っている。なお、通水口を大きくすると海水交換量は大きくなるが波高伝達率は大きくなるため、開口部をできるだけ低い位置にするなどの工夫がなされている。

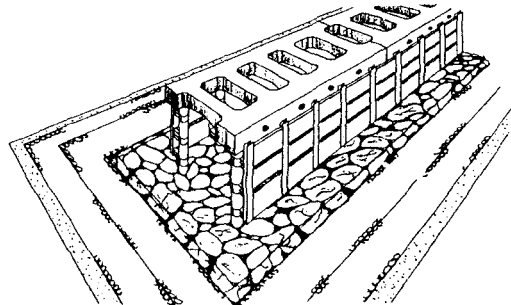


図-28 横スリット式カーテン式防波堤（博多港）

図-27は瀬棚港の防波堤の断面図であり、海水交換のための通水口をもつものである（柳瀬1991）。この通水口は港外側がブルマウス状になっており、港外側にプレート状のフィンがついており、流れを港外側から港内側に導きやすい形となっている。なお、浦河港では消波ブロック被覆防波堤のケーソンに通水口を設けている（水野ら1992）。

このほかにも種々の有孔型の透過堤が開発されているが、こうした開口部（通水口）によって、空隙型の透過堤と同様に、長周期の波や流れがある程度透過するだけでなく、通常の波によっても海水交換が期待できる。ただし、波による海水交換は防波堤の近傍に限られるようである。

流れを阻止しない開放型

開放型の透過堤とは、断面的に見た場合に流れを阻止しない開放部があるものである。浮防波堤（大隈ら1985、国際海洋科学技術協会1987）やカーテン防波堤は、開放型の透過堤としてもっとも一般的なものであり、

特に水深が大きく波が比較的小さい内湾域の防波堤として、多く用いられている。図-28は、博多港のカーテン防波堤（樫木・岩田1975、運輸省第四港湾建設局1980）であるが、カーテン部の直立壁にもある程度透過性を持たせるために開口部がある。

また、**潜堤**も開放型の透過堤として最近多く用いられているが、これは水深が小さい場合で、かつ景観を重視する場合に用いられている。開放型透過堤として1980年代に注目されて多くの研究がなされたのは、**水平板式**の防波堤である（井島ら1970、服部1975、谷本ら1985、余ら1991、吉田ら1993）。海中におかれた水平な板は、それによって波を反射することができ、水平板上の水深を浅くすることによって、砕波による消波も期待できる。水平板は長周期の波や流れを容易に透過する構造であり、海水交換機能にも優れた構造である。しかしながら、水平板は消波のためにはある程度の幅が必要であり、これが経済上の問題となっている。ただし、水平板の上部などにスリット壁を設けて改良したりして機能と経済性を向上させた構造も考案され、一部に実際に施工されたものもある。

さらに、開放型の透過堤として興味あるものに、長崎港のハウステンボスに設置された**フレキシブルマウンド**（田中ら1994）や**フラップボード**（中野ら1994）と呼ばれるもの、さらには**液状化消波システム**（高橋ら1995）などがある。

5.2 造流堤

弁による整流

有孔型の透過堤では、波によってある程度海水交換が行われるが、防波堤の付近に限られるようである。これに対して、積極的に波を利用して流れをつくり出そうとする防波堤も考えられている。ここではそれらを**造流堤**と呼ぶことにする。すなわち、波による水粒子の動きは往復流であり、造流堤は、これを一方向の流れに変えることができる防波堤である。

波から**一方向流**を造る基本的なものは、**弁**である。ケーソン堤に穴をあけ、これに弁を付けることによって一方向の流れを造ることができる（岡本ら1985）。こうした研究は古くから行われているが、弁の機構に問題があるためあまり多くは実用化されていないが、北海道の天売港防波堤（図-29）で採用されている。図から分かるように、通水港の後部には球が入れられており、この球が弁として働いている。

波から**一方向流**を造るもう一つの機構は、**越波**あるいは**越流**である。越波や越流は、港外側から港内側への流れであり、実際越波が多い港では港内の水質悪化は少ない。例えば表-4は、3つの港の**年間総越流量**の概算値（波浪観測結果と合田の越流量算定図より計算）を示すものであり、通常の高さ（ $0.6H_{1/100}$ ）では内湾の神戸港では $12 \text{ m}^3/\text{m}$ 程度であるのに対し、釜石港では $640 \text{ m}^3/\text{m}$ 、鹿島港では $10000 \text{ m}^3/\text{m}$ とかなり大きくなっている。 $10000 \text{ m}^3/\text{m}$ の年間総越流量は、断面的に考えて防波堤背後が 1000 m あるとして水深 10 m

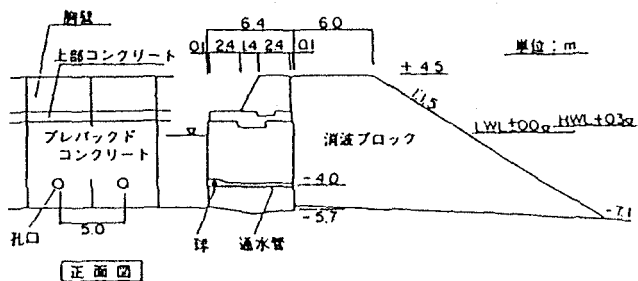


図-29 弁による防波堤

表-4 年間総越流量

港名	天端高さ	
	$0.3H_{1/100}$	$0.6H_{1/100}$
神戸港 $H_{1/100} = 4.5 \text{ m}$	$2.0 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m}$ (0.08 %)	$1.2 \times 10^1 \text{ m}^3/\text{m}$ (0 %)
釜石港 $H_{1/100} = 7.8 \text{ m}$	$8.3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m}$ (0.97 %)	$6.4 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m}$ (0.08 %)
鹿島港 $H_{1/100} = 8.6 \text{ m}$	$6.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}$ (4.44 %)	$1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}$ (1.26 %)

() : 越流量が $0.005 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ 以上の頻度

分に相当する大きな海水交換量であることが容易にわかる。防波堤による海水交換を考えると、この通常天端の防波堤による年間総越流量が重要であり、これが一つの指標となる。例えば、神戸港で天端高さを1/2に下げれば、年間総越流量が $200\text{m}^3/\text{m}$ となり、通常の高さの場合の16倍で、釜石港における通常天端の防波堤の年間総越流量にやや近づくことになる。なお、年間総越流量と港内の水質との関係については、潮汐による海水交換や流入負荷等も考慮して検討しなければならないのは当然である。

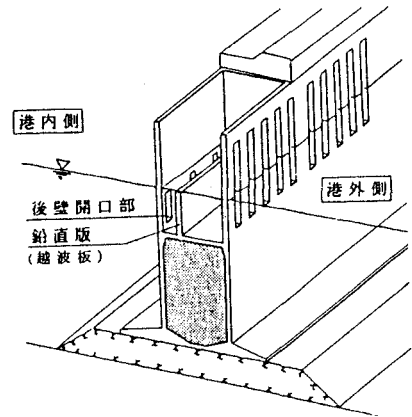


図-30 遊水室の越波板による海水交換

伝達波高が小さく越波流量が大きい構造の開発が必要

防波堤の天端を低くするなどして、越波をより大きくすると、海水交換機能は高まるが、越波による伝達波が大きくなって、防波堤本来の機能が低下することになる。したがって、越流量は多いがそれによって発生する伝達波が小さい構造が必要がある。

たとえば、前述の半円形ケーソンは円形構造であるために越波が多いが、港内側の円形部材にけられた穴によって、越波した波が乱されて、越波流量が多い割には伝達波が小さい傾向にある。

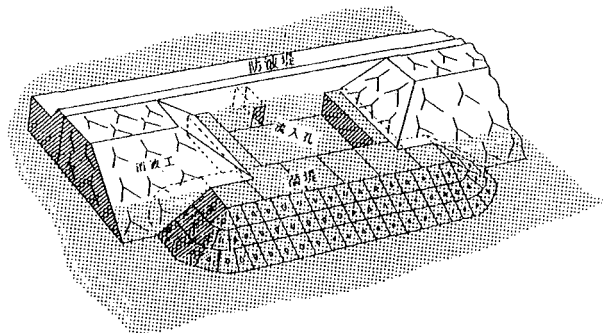


図-31 潜堤付き防波堤

図-30は、直立消波ケーソン内に**越波板**

(静水面付近までの鉛直板)を入れたもの(塩崎ら1996)で、これを越える波による海水交換をめざすものである。また、図-31は、**潜堤付き防波堤**(山本ら1988、中村1991)であり、潜堤で砕波させて越流させ、そこでの水位上昇を利用して防波堤の通水口を通して港外側から港内側に流れを発生させようとするものである。同様な考え方による**遊水部付き防波堤**もあり、防波堤の前に天端の低い不透過壁を設けて遊水部を造り、ここに越波する波を利用するもので、北海道の様似漁港で建設されている。

6. あとがき

ここに述べた1970年代からの新構造防波堤の開発や、同時期に進んだ波エネルギー変換装置の開発などによって、近年、波と構造物の相互作用に関する理解が飛躍的に進んだように思われる。こうした知識を基に、さらなる発展が期待されているが、そのためには形状だけでなく材料や地盤、施工を含めた検討が必要であり、新たな発想も必要となっている。また、こうした新構造防波堤の設計は、防波堤の設計法全体を見直す契機ともなっており、限界状態設計法などの信頼性設計の確立が急がれている。

本テキストをまとめるにあたり、これまで実施された新構造に関連する多くの委員会における討議等を参考にさせていただいている。横浜国立大学の合田良実教授、埼玉大学の谷本勝利教授、京都大学の高山知司教授、早稲田大学の清宮 理教授、沿岸開発技術研究センターの稲垣紘史常務理事、日本港湾コンサルタントの滑川伸孝・鈴木孝幸氏、東電設計の樋口豊久氏ほか、大学、港湾建設局、コンサルタント会社等の各位に、深甚の感謝の意を表します。また、このテキストをとりまとめる機会を与えていただいた東京大学の渡辺 晃教授、中央大学の水口 優教授、徳島大学の中野 晋助教授にも深甚の感謝の意を表します。なお新

構造の防波堤については、本テキストに述べた以外にも数多くの研究がなされていますが、紙面の関係でふれることができなかつたことをお詫びいたします。

参考文献

- JARLAN, G. E. (1961) "A perforated vertical breakwater", The Dock and Harbour Authority, Vol.41, No.488, pp.394-398.
- 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰(1970)：水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究、第17回海岸工学講演会論文集、pp.97-106.
- 村上啓介・入江 功・上久保祐志(1996)：非越波型防波護岸の天端高さ与作用波圧について、海岸工学論文集、pp.776-780.
- 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄(1966)：防波堤の安定性に関する研究、港湾技術研究所報告、第5巻第14号、134p.
- 伊藤喜行(1969)：防波堤構造論史、港湾技研資料、No.69、78p.
- 運輸省第四港湾建設局(1980)：博多港北防波堤[規則波実験]、下関調設技報、NO.1、pp.49-71.
- 沿岸開発技術研究センター(1994)：新形式防波堤技術マニュアル、240p.
- 沿岸開発技術研究センター(1991)：合成板ケーソン設計マニュアル、202p.
- 沿岸開発技術研究センター(1996)：半円形防波堤設計・施工マニュアル、101p.
- 遠藤博・中野 勉・大脇 崇・黒沢 薫(1992)：二重円筒ケーソン式堤の実証試験、海洋開発論文集、vol.8、pp.231-236.
- 大久保寛・小島一雄・高橋重雄(1993)：上部斜面型杭式波浪制御構造物の耐波安定性に関する検討、第48回土木学会年次講演会講演集(第2部)、pp.844-845.
- 大隈正登・江河直人・中野敏彦・加藤英夫(1985)：浮防波堤の動揺特性と消波性能に関する現地実験、第32回海岸工学講演会論文集、pp.520-524.
- 岡本 博・森下敏夫(1985)：海水交換機能を持つ弁式有孔堤について、第32回海岸工学講演会論文集、pp.540-544.
- 奥野俊彦・村野清一郎・阿部修司・北村治男(1994)：原町火力防波堤における台形ケーソン上部斜面堤の開発について、電力土木、No.251、pp.20-29.
- 小島朗史・森脇敏雄・藤崎治男・岩田 望・難波喬司(1986)：マルチセルラーケーソン式防波堤の開発について、海洋開発論文集、Vol.2 pp.133-138.
- 小島朗史(1992)：PC鋼線を用いた台形ケーソンの海上浮遊接合法の開発、プレストレストコンクリート、Vol.34、No.4.
- 角野昇八・小田一紀・藤田 孝・寺岡章吾・芳田利春(1989)：スリットと任意断面形状で構成される構造物の消波特性の解析、海岸工学論文集、第36巻、pp.499-503.
- 片岡真二・斉田和成(1986)：防波堤構造収攬、港湾技研資料、No.556、150p.
- 角湯正剛・阿部宣行・田中寛好・斉藤昭三(1987)：斜面スリット型ケーソンの開発とその水理特性、第34回海岸工学講演会論文集、pp.477-481.
- 木原力・成瀬進・下司弘之・酒井洋一・高橋誠(1988)：軟弱地盤着底式防波堤の開発について、第35回海岸工学講演会論文集、pp.742-746.
- 木村正信・長沼淳也・山本廣・田所篤博・田端竹千穂・小林邦夫(1995)：水平板式(サンドバス型)防波堤の水理特性把握実験、第13回土木学会新潟会研究調査発表会論文集、pp.73-79.
- 清宮 理・本多宗隆(1993)：半円形防波堤部材の載荷試験、港湾技研資料、No.759、30p.
- 高 隆二・木村 弘(1972)：Crenellated Breakwaterの伝達波、第19回海岸工学講演会論文集、pp.205-210.
- 国際海洋科学技術協会(1987)：浮防波堤一現状と課題一、89p.
- 小島治幸・井島武士・田口陽一・安永達郎(1986)：縦スリット式防波堤の水理特性の算定法に関する研究、第33回海岸工学講演会論文集、pp.402-406.
- 合田良実・福森利夫(1972)：直立壁および混成堤に働く波圧に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第11巻第2号、pp.3-46.
- 合田良実(1973)：防波堤の設計波圧に関する研究、港湾技術研究所報告、第12巻、第3号、pp.31-70.
- 合田良実・岸良安治(1976)：不規則波による低天端護岸の越波特性実験、港湾技研資料、No.242、28p.
- 近藤淑郎・竹田英章(1983)：消波構造物、森北出版(株)、275p.
- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三(1992)：消波ブロックが覆う上部斜面堤の水理特性、那覇港大水深防波堤における新構造防波堤の開発、海岸工学論文集第39巻、pp.556-560.
- 榎本 亨・岩田好一朗(1975)：横スリット型防波堤の消波効果と現地への適用条件について、土木学会論文集、第237号、pp.63-74.
- 塩崎禎郎・磯崎絵一郎・中村 滋・堀内 博(1996)：海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発、海洋開発論文集、Vol.12、pp.79-84.
- 下迫健一郎・高橋重雄・斉藤祐一・三浦裕信・H. Oumeraci(1996)：消波型直立部を用いた高基混成堤の開発、海岸工学論文集、第43巻、pp.851-855.
- 高橋重雄・谷本勝利(1984)：直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)、現地観測波圧データの解析、港研報告、第23巻、第2号、pp.3-25.
- 高橋重雄・下迫健一郎(1990)：長大ケーソンの波力平滑効果と耐波安定性、港湾技研資料、No.685、20p.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均(1991)：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法、港湾技術研究所報告、第30巻第4号、pp.3-34.
- 高橋重雄・細山田得三・片山 忠(1991)：曲面二重スリットケーソン堤の水理特性、港湾技研資料、No.720、24p.
- 高橋重雄(1992)：新形式防波堤の開発、第5回技術講習会テキスト、寒地港湾技術センター、pp.11-34.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992)：混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案、海岸工学論文集、第39巻、pp.676-680.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均(1992)：二重円筒ケーソンに作用する波力と滑動安定性に関する実験的研究-境港現地実証試験に関する再現実験-、港湾技研資料、NO.742、33p.
- 高橋重雄(1993)：波エネルギー変換装置の現状について、土木学会水工学シリーズ、93-B-1.
- 高橋重雄・下迫健一郎・山本 悟・三浦裕信(1995)：液状化した砂地盤の特性とそれによる消波に関する基礎実験、海岸工学論文集、第41巻、pp.611-616.

- 高橋重雄・鈴木高二朗・三浦裕信・齊藤祐一(1995): 低天端型防波護岸の越波に関する一実験、海洋開発論文集、Vol. 11、pp. 193-198.
- 高橋重雄・下迫健一郎(1996): 防波堤の耐波設計、港湾工学専門技術者水工コース研修テキスト、運輸省港湾技術研究所、85p.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982): 各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻、第2号、pp. 151-206.
- 竹田英章・赤塚雄三・河口隆明(1976): ブロック式直立消波構造の水理特性、第23回海岸工学講演会論文集、pp. 117-122.
- 田中正博・源波修一郎・堀 哲郎・佐藤 博(1994): 港湾開口部に適用したフレキシブルマウンド (F L M) の消波効果と安定性、海岸工学論文集、第41巻、pp. 626-630.
- 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司(1980): 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第19巻第4号、pp. 3-53.
- 谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木論司(1981): マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第20巻 第2号.
- 谷本勝利・吉本靖俊(1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論および実験的研究、港湾技術研究所報告、第21巻、第3号、pp. 43-77.
- 谷本勝利・吉本靖俊(1984): 斜め入射波による曲面スリットケーソンの反射および部材波力特性に関する実験的研究、港湾技研資料、No. 493. 49p.
- 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄(1985): 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1) - 透過性構造(海底設置型)の反射及び伝達特性に関する不規則波実験 -、港湾技研資料、No. 516、39p.
- 谷本勝利・木村克俊(1985): 台形ケーソンの水理特性に関わる実験的研究、港湾技研資料、No. 528、27p.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司(1988): 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究(第1報) - 台形直立部に働く波力及び滑動安定性 -、港湾技術研究所報告、第37巻第1号、pp. 3-29.
- 谷本勝利・下迫健一郎(1988): 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その5) - 二重円筒ケーソン(マウンド設置型)の水理特性と設計波力 -、港湾技研資料、No. 637. 24p.
- 谷本勝利・濱川伸孝・石丸敬純・関本恒浩(1989): 半円形ケーソンの水理特性に関する実験的研究、港研報告、第28巻第2号、pp. 3-32.
- 谷本勝利(1990): 波と関る防波堤一波の力と新しい防波堤構造一、土木施工31巻5号、pp. 73-85.
- 田端竹千穂・北山優・藤井敦・梅木功・米倉宏司(1995): 福井港における二重半円筒ケーソン防波堤の設計と施工、第三回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 257-262.
- 時川和夫(1979): スリット型ケーソントイプ特殊防波堤の開発、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 328-332.
- 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田隆(1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験、第30回海岸工学講演会論文集、pp. 313-316.
- 中田邦夫・寺内深・西田一彦・梅木功(1984): 低天端防波堤の諸特性、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 532-536.
- 中野拓治・岩上淳一・溝内俊一・吉川信彦(1982): 斜め入射波に対する直立消波構造物の消波特性について(その2) --- 水理模型実験 ---、第29回海岸工学講演会論文集、pp. 400-404.
- 中野 晋・三島豊秋・鈴木直人・三井宏(1994): ゴムフラップ消波堤による波高減衰、海岸工学論文集、第41巻、pp. 631-635.
- 中村 充(1991): 水産土木工学 - 生態系海洋環境エンジニアリング、工業時事通信社、561p.
- 萩原運弘(1984): 直立消波ケーソンの消波特性に及ぼす斜め入射波の影響、第31回海岸工学講演会論文集、pp. 502-506.
- 服部昌太郎(1975): 水平板式透過性防波堤の波高伝達率、第22回海岸工学講演会論文集、pp. 513-517.
- 馬場孝博・菊池身智雄・奥田薫・豊田裕作(1992): 消波ブロック内蔵双胴型ケーソン堤の開発、海洋開発論文集、vol. 8、pp. 249-252.
- 船越晴世・津田修一(1994): 後部パラペット型防波堤の水理特性について、土木学会関東支部研究発表会講演概要集.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利(1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について、海岸工学論文集、第41巻、pp. 706-710.
- 堀口孝男・小坂俊吉・中道峰夫・布施敏一郎(1980): スリット壁式消波構造の水理解析、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 325-329.
- 水野雄三・谷野賢二・木村克俊(1992): 海水交換型防波堤に関する水理特性について、海洋開発論文集、Vol. 8、pp. 253-258.
- 松井康彦・津田修一・北山 優・田端竹千穂(1994): 後部パラペット型防波堤の開発、土木学会新潟会調査研究発表論文集、pp. 131-136.
- 村田繁・山本修司・今野茂・木村岩男・岩淵榮一(1982): 横スリットケーソンに作用する波力機構について、第29回海岸工学講演会論文集、pp. 404-408.
- 森平倫生・国田 治(1979): 斜面堤の水理特性に関する模型実験、第26回海岸工学講演会論文集、pp. 295-298.
- 森 好夫・越塚 博・笹山 博・野上富治(1989): 釜石港湾口防波堤大型台形ケーソンの設計、海洋開発論文集、vol. 5、pp. 37-42.
- 門司剛至・村山伊知郎・元野一生・高田直和(1989): 軟弱地盤着底式防波堤の開発について、海洋開発論文集、vol. 5、pp. 103-107.
- 柳生忠彦・湯生美幸(1980): 直立消波ブロック式防波堤構造取攪、港湾技研資料、No. 358、314p.
- 柳瀬友之・谷野賢二・水野雄三・梅沢信敏・桑原伸司(1991): 有孔堤の海水交換機能に関する研究、海岸工学論文集、第38巻、pp. 856-860.
- 山下廣行・和田 信・大釜達夫・小林郁美・田中克己・藤井 亨(1996): 半円形防波堤の現地実証実験について、海洋開発論文集、Vol. 12、pp. 279-284.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文(1988): 海水導入を目的とした潜堤付き防波堤の開発(1)、水産土木、第10号、pp. 39-54.
- 余錫平・磯部雅彦・渡辺 晃(1991): 没水平板に作用する波力に関する研究、海岸工学論文集、第38巻、pp. 671-675.
- 吉江宗生・石原弘一(1995): パネルシステムケーソンの製作及びケーソンの配筋・型枠の自動化、土木施工、No. 9、pp. 33-39.
- 吉田明徳・長井健二・田代晃一・入江 功・小島知幸(1993): 二重管係留没水平板の波浪制御に関する線形理論の適用性と非線形効果、海岸工学論文集、第40巻、pp. 616-620.
- 和田信・今国盛(1993): 海上浮遊接合法による大型台形ケーソンの施工、土木施工、34巻3号、pp. 13-20.
- 輪湖建雄・松本清次・村山伊知郎・甲斐正義(1990): L型消波防波堤の開発について、海洋開発論文集、Vol. 6、pp. 143-148.