

防波堤の新しい構造を求めて

谷 本 勝 利*

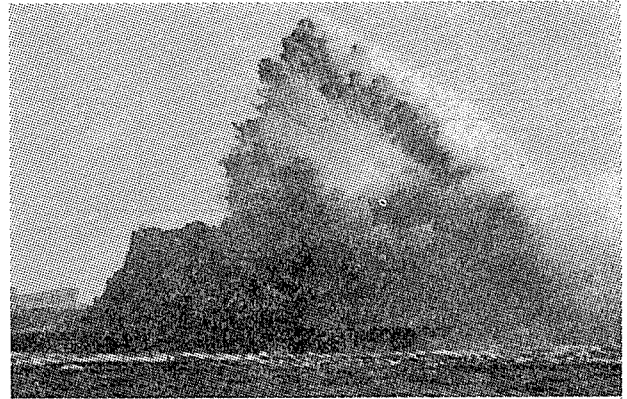
1. はじめに——波と闘う海の第一線防波堤——

海の波は巨大な力を秘めており、大海の激浪下にあつては大型船舶も木の葉のように揺れ動く。港湾においてはこうした波の侵入を防ぎ、静穏な海面を確保するために防波堤が建設される。すなわち、防波堤は波と闘う港湾の第一線構造物であり、港湾施設の中でも技術的、工費的に大きな比重を占めている。

我が国におけるその防波堤の主流構造様式は捨石マウンドの上に直立コンクリート函体を据え付けたケーソン式混成堤であり、これの建設技術に関しては圧倒的実績と多年にわたる調査研究を背景に、世界に冠たるものとなっている。しかし、この構造を水理的にみた場合、前面が不透過な直立の壁であるため、反射波が大きいという短所がある。また、波の作用を一面でかつ同位相で受けるため、作用波力が大きくなり、条件によっては写真—1に見られるように波が爆発したような強大な衝撃砕波力が作用する。

これらの混成堤の短所は、近年における防波堤建設をとりまく種々の情勢の変化によって、一層顕在化している。すなわち、港湾の高密度利用あるいは周辺海域における小型船の操船等における安全性向上の指向は、構造物からの波の反射による擾乱の増大を問題化し、多くの港湾で低反射構造物の建設を要請している。また、自然条件に恵まれた天然の良港から外海港湾建設への進展は波浪条件の厳しい所での防波堤建設を余儀なくし、現在では直立部の幅が 20 m を超える防波堤は珍しくない。

以上のような通常のケーソン式混成堤の短所に対し、



写真—1 防波堤への波の作用

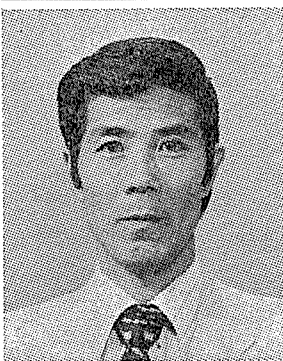
従来水深の比較的浅い所では、直立壁の前面に異形コンクリートブロックを投入した消波ブロック被覆堤を採用することで対処されてきた。しかし、この構造においても、近年における防波堤建設地点の大水深化およびそれに伴う設計波の大波高化はブロックの重量を著しく大なるものとし、ブロック自身の強度確保の問題を新しく提起している。また、この構造は半傾斜型であるため、大水深化するにつれて堤体断面が著しく大となり、工費が急速に高騰するといった難点がある。たとえば、工費について言えば、有義波高 9 m、有義波周期 14 秒の設計波に対する消波ブロック被覆堤 1 m あたりの建設費は、水深 20 m 地点で 2 千 4 百万円、水深 50 m 地点で 7 千万円と試算されている。そのため、大水深・大波高条件に適した新しい経済的な防波堤構造の開発、実用化が強く望まれているところである。そこで、本文では波を止める防波壁の基本形とその応用について考察し、幾つかの新しい防波堤構造あるいはアイデアを紹介することにした。

2. 防波壁の基本形

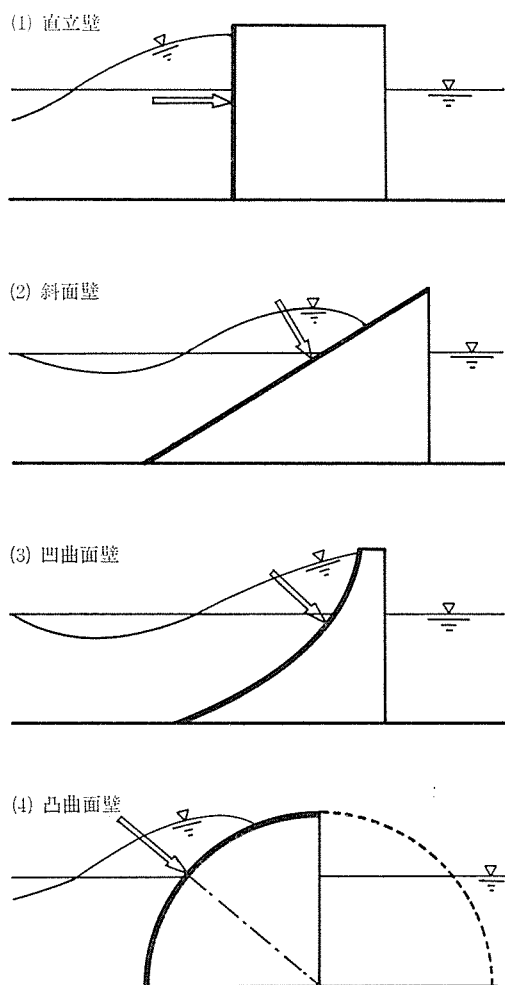
1. で述べたように、防波堤の第一義的機能は波の侵入を阻止することであり、その最も単純な方法は海水を遮断することである。この遮断面を防波壁と呼ぶ。防波壁の形状は断面的に見ただけでも限りなくあるが、基本的には図—1 に示した 3 種を挙げることができる。その特徴を簡単にまとめると以下のとおりである。

① 直立壁

海水を遮断するのに壁面長が最も短い。ただし、重力



* Katsutoshi TANIMOTO
運輸省港湾技術研究所
水工部 防波堤研究室長



図—1 防波壁の基本形

式では波力に耐えるのに十分な壁幅が必要となる。水理的には前述したように反射波が大きいという特性を有する。また、壁面にはほぼ同位相で水平波圧が働き、その合力である波力が大となる。

② 斜面壁

直立壁を傾斜させたもので、海水を遮断するのにそれだけ壁面長が長くなる。しかし、波圧は斜面壁に直角に働き、それが垂直成分を有するため、重力式においては波力に対する安定性が非常に高いという特長を有する。ただし、波が斜面をはい上るので、越波しやすいという短所がある。

③ 凹曲面壁

斜面壁と同様な特性を有し、壁面長はやや短くなるが波圧の大きい水面付近の勾配が急となるため、水平波力がやや大となる。

④ 凸曲面壁

これも斜面壁とほぼ同様な特性を有する。円弧の場合波力は常に円の中心に働き、半円形断面の場合には回転力が生じないという特長を有する。

以上のうち、①の直立壁は直立堤や混成堤の直立部などの形で通常の防波堤として応用されている。新しい防波堤構造を探る場合、②以下の耐波安定性上の特長を取り入れることがまず第一に考えられるところであり、これらの基本形の応用について既往の例なども含めて更に考察する。

3. 波の力で耐える防波堤構造

3.1 斜面壁の応用

前述の②～④の防波壁はいずれも壁面に斜め下向きの波力が働き、その鉛直成分が構造物を押さえることになるので、その意味では波力の一部を利用し、波の力で耐える構造といえる。

これの典型的例が斜面ケーソンであり、まず理想的な状態を考えてみる。前出の 図—1 の (2) において、斜面と水平面とのなす角度を θ とし、斜面に直角に働く波力（合力）を F_S と表記する。このとき、 F_S の水平成分 F_H 、および垂直成分 F_V は次のように表される。

$$F_H = F_S \sin \theta, \quad F_V = F_S \cos \theta$$

いま、傾斜角を水平成分と、垂直成分に対する摩擦抵抗力がバランスするように選び、このときの θ を θ_0 と表記する。つまり、

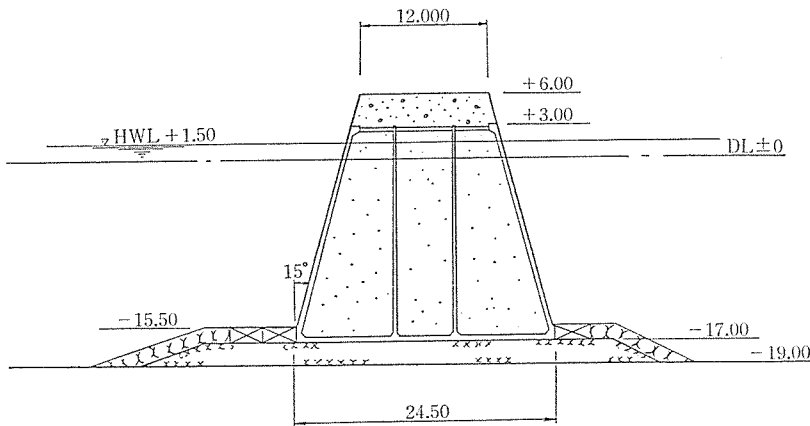
$$F_H = \mu F_V, \quad \tan \theta_0 = \mu$$

ここに、 μ はケーソンと捨石マウンドの間の摩擦係数である、この θ_0 の値は $\mu=0.6$ のとき、約 31° アスファルトマットを用いて $\mu=0.7$ とすると約 35° である。つまり、傾斜角をこのように選定すれば、少なくとも滑動安定性に関する限り、斜面壁に働く波力は考慮する必要がなくなり、底面に上向きに働く揚圧力に抗するだけ（実際には波の谷のときの波力も考慮する必要がある）の重量があればケーソンは自ずから安定となる。

しかし、実際の応用を考えると全水深を斜面壁とすることは困難で、下部を垂直壁として上部のみを斜面壁とした複合型となることが多い。これを上部斜面壁堤と呼ぶが、この例としては古くはイタリアのタルカファノの例¹⁾があり、また近年においては下部が円筒で上部工のみを斜面としたものであるが、デンマークのハンストホルム港²⁾ やリビアのマルサ・エル・ブレガ港³⁾ においても建設されている。

我が国においては、運輸省第一港湾建設局が上部斜面ケーソンについて系統的な調査研究を行っており⁴⁾、新潟東港等において実施されている。

また、港湾技術研究所では東京電力（株）から要請を受けて、図—2 に示したような台形ケーソンの水理特性に関する実験を行い、若干の傾斜であってもそれに応じた鉛直下向き成分が働き、更にケーソン底面に上向きに



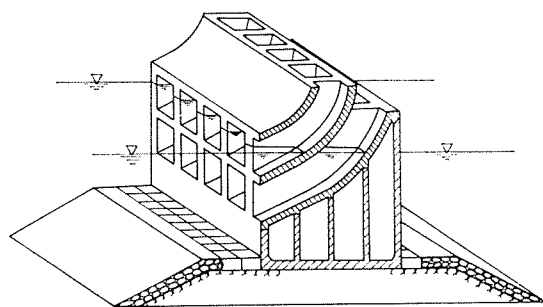
図—2 台形ケーソン堤 (模型実験)

働く揚圧力が減じて、波力安定性の面からは利点の多いことを明らかにしている。

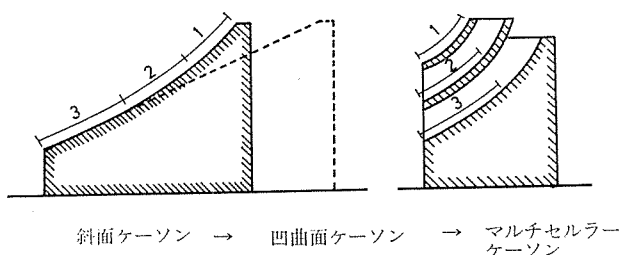
3.2 凹曲面壁の応用

凹状曲面壁は海岸堤防では一般的に用いられているけれども、防波堤としての実施例はこれまでない。伊藤⁵⁾によればフランスのグーレはマウンド被覆石の安定性の面から完全重複波の流線に一致させた形状の曲面サイクロピアンブロック堤を提案しているが、実施には至っていない。

このグーレの発想とは異なるが、港湾技術研究所では外海大波高の波に対しても比較的狭いケーソン幅で安定を保ち得る構造として、マルチセルラーケーソンを提案した。これは図—3に示しているように、ケーソン内部に3段の曲り斜面壁を設け、これらの曲り斜面壁の間の中空部が前面の海側および後半部の天端面に開口しているところに構造的特徴がある。その発想の経緯は図—4に



図—3 マルチセルラーケーソン堤 (現地実証実験)



図—4 マルチセルラーケーソンのアイデアへの経緯

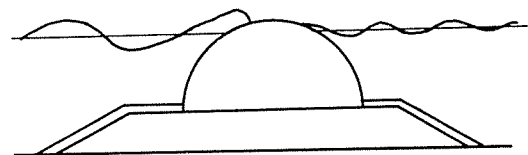
説明しているとおりであり、斜面壁堤から凹曲面壁堤、更にはその立体的積み重ねというアイデアで提案されたものである。すなわち、滑動安定性の上からは前述したように斜面ケーソンが優れているが、越波を押さえ、十分な壁面長を確保するためには相当の堤幅が必要となる。この斜面ケーソンの越波を小さくし、かつ堤幅を小さくする方策としては斜面の上部を次第に急斜面とした曲面壁とすればよい。しかし、そのままではなお相当の幅を必要とし、工費も

かさみ、また施工も困難である。そのため、上向きの曲り斜面壁を数個に分割して、これを鉛直に積み重ね、堤体をコンパクトに納めたものである。この構造については実験によって水理特性を明らかにし⁶⁾、波力が著しく軽減されることを確認したのち、その性能を現地で実証すべく第三港湾建設局の和歌山港工事事務所において試験用函体が製作されつつあるところである。

3.3 凸曲面壁の応用

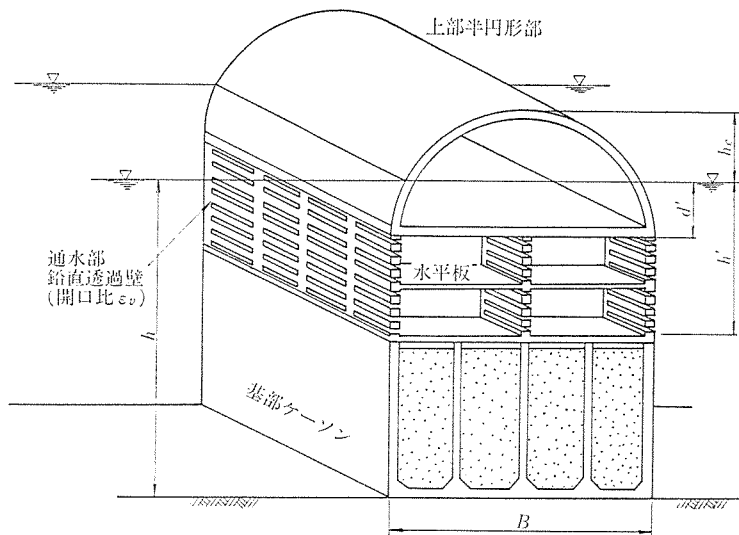
上部を石張りで曲面としたものには室津港の防波堤がある⁷⁾。また、筆者らは凸曲面壁を取り入れたものとして曲面スリットケーソンを提案している⁸⁾。ただし、この曲面スリットケーソンの発想は直立消波ケーソンと関係しているのもので後述することにし、ここではその他の応用を考えてみる。

凸曲面壁の特長は前述したように半円形断面としたときに顕著に現れる。すなわち、図—5に示しているよう



図—5 半円形断面ケーソン堤 (アイデア)

に、半円形断面ケーソンをマウンドの上に設置すれば、底版に働く揚圧力を除いて壁面に働く波圧はすべて円の中心に向かうから、合成力も円の中心を通ることになる。したがって、これによる回転モーメントは発生せずわずかに揚圧力のみによる回転モーメントが生じるにすぎない。その結果、地盤反力は等分布に近いものとなる。また、鉛直成分は堤体の安定性に寄与し、滑動波力も小さくなることから全体としての軽量化が図れる。こうした略等反力型の構造は軟弱地盤上の防波堤として活用可能性がある。



図—6 上部半円形断面構造 (模型実験)

また、半円形断面構造は背の高い建造物の上部構造としても利点を有する。図—6 は沖合大水深域で大波高の波を制御し、適度に静穏な海域を造成する波浪制御構造物として提案している上部半円形断面構造を示したものである。これは基部ケーソンの上に通水部を設け、更にもその上の波あたりの厳しい水面付近を半円形断面としたもので、背が高くても比較的狭い幅で安定性が保持できる構造を狙ったものである。実際、この構造について伝達波および作用波力に関する実験を行っているが、たとえば周期 15 秒、波高 15 m の波に対して基部ケーソンを除いた上部構造に働く水平合波力は通常直立壁に働く波力の約 63% に減じ、しかもそのときの基部ケーソン上面を含めた上部構造に働く鉛直波力は下向きで、基部ケーソン底面に働く揚圧力をほとんどキャンセルすることが明らかになっている。

4. 波を吸収する防波堤構造

4.1 直立透過壁と消波ケーソン

以上、防波壁の基本形状とその幾つかの応用例を示したが、そこでの防波壁の基本形状は海水を完全に遮断するものであった。しかし、既に上部半円形断面構造で示したように、防波壁の一部あるいは全体に透き間を設けて透過性とするところがあり、こうした通水性を有する壁を透過壁と呼ぶ。この種のもので実施例が多いのはカーテン防波堤である。これは波のエネルギーの集中する水面付近のみ不透波な直立壁を設け、下部を開口したものである。そのほか、鋼管を透き間をもたせて配列した透過性鋼管防波堤もある。この場合反射波、透過波が生じるが、開口部での水平噴流の運動エネルギーの一部が渦の形成

に使われ、やがて乱れによって逸散してしまうために、エネルギーが消費される。

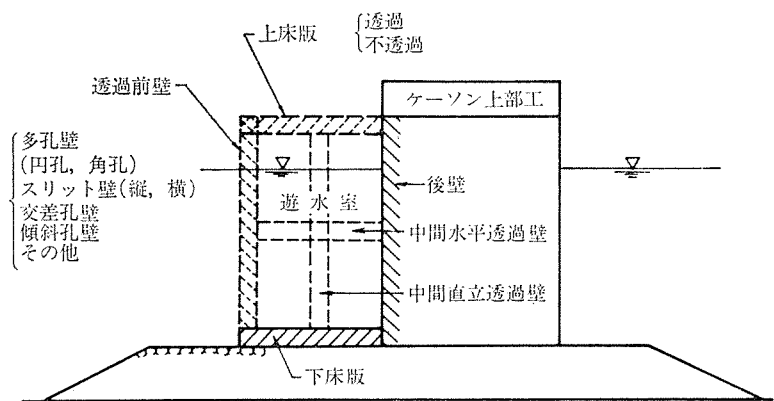
こうした直立透過壁は上述したようにそれ自体単独に防波堤に応用し得るけれども消波性能の面でも、また耐波安定性の面でも限界がある。そのため、直立透過壁のエネルギー消費機構を活用し、かつ一体構造で全体としては前後面での海水を遮断する不透波ケーソンが考えられる。つまり、直立透過壁と不透波壁の組合せであり、Jarlan の多孔ケーソンが代表的なものである。図—7 はその消波ケーソンの構造要素を模式化して示したものであるが、透過壁と遊水室を有し波のエネルギーを吸収する構造であり、各要素の種々の組合せにより

多様な構造が考えられ、各種の消波ケーソンが研究開発されている。これらに共通する消波ケーソンの特長を列記すれば次のとおりである。

- ① 反射波を軽減することができる。
- ② 越波、したがって伝達波を軽減できる。
- ③ 波力を緩和することができる。特に、高マウンド上等にあって強大な衝撃砕波力が発生するような場合であっても、滑動波力としては異常な増大がない。
- ④ 気泡の混入を促し、海水の曝気能を持つ。また、漁礁効果も期待できそうである。

4.2 波矢来堤曲面スリットケーソン

先にもふれた曲面スリットケーソンも消波ケーソンの一種であり、図—8 に示しているように透過前壁と遊水室上床版を曲面スリット壁で一体とした、中でも特殊な形状の構造である。この構造は、消波ケーソンを波浪条件の厳しい外海において採用していくためには、強大な波力に耐えるだけの安定性と部材強度を確保しやすい構造であることが好ましいことから、図—9 に示した経緯で発案したものである。すなわち、発想の原点は滑動安



図—7 消波ケーソンの構造要素

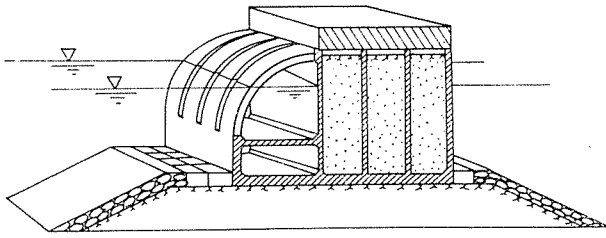


図-8 曲面スリットケーソン堤（実施）

定性の面で優れている斜面ケーソン（斜面壁堤）と消波ケーソン（遊水堤）の結合にあり、その単純な結合形である斜面スリットケーソンから、構造上の利点を考慮してスリット壁を滑らかな曲面壁とし曲面スリットケーソン（曲面スリット壁堤）へと発展させたものである。

この曲面スリットケーソンは京都の古い街並みに見られる竹製の犬矢来のイメージも発想の原点にあり、波矢来堤（波の侵入を排除する囲い）とも呼べるものである。写真-2 はその犬矢来の例を示すものであるが、現在では、スチール製で非常に近代化されているものもある。一方、写真-3 は船川港の南防波堤に用いられる曲面スリットケーソン（仮置き中）を示したものであり、これらの矢来（スリット部材）はプレストレストコンクリート製である。この設計と施工については別に報告されているが、このようにプレストレストコンクリート部材が外海波浪に耐える防波堤の部材として用いられるのは我が国では初めてであるといつてよい。ここに至るまでにはプレストレストコンクリート技術協会の方々にも多大な御協力を頂いたところであり、本紙面を借りて厚くお礼を申し上げる次第である。

4.3 円筒防波堤透過壁式二重セル構造

防波堤の構造は断面形状のみならず、平面形状においても工夫の余地があり、通常の四角形形状と異なる形で

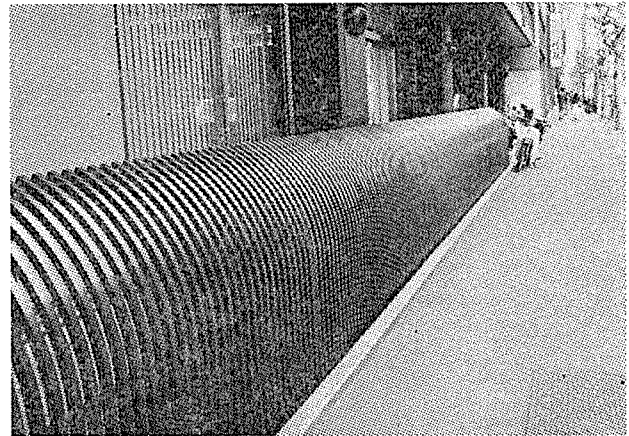


写真-2 犬矢来（三井不動産建設池内章雄氏提供）

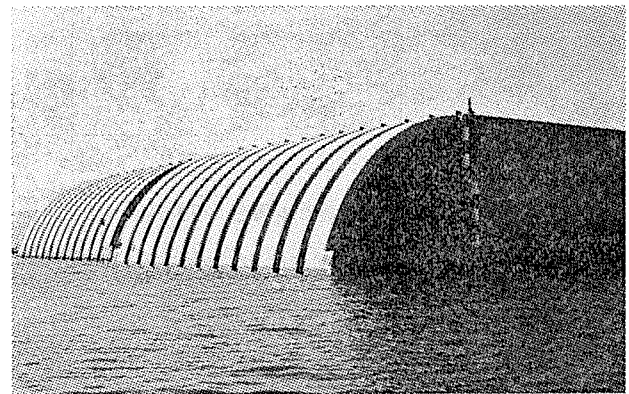


写真-3 仮置き中の船川港曲面スリットケーソン（運輸省第一港湾建設局秋田港工事事務所提供）

最も実施例の多いのは前述のハンストホルム港やマルサ・エル・ブレガ港等で用いられている円筒構造である。

図-10 は前出の図-6 の上部半円形断面構造と同様に、大水深・大波浪海域での波浪制御構造物として検討を進めている透過壁式二重セル構造の概念図である。これは基部ケーソン（四角形）の上を二重円筒構造とし、静水面付近の外壁を透過性としたもので、円筒構造による材料の節約を図りつつ、水面付近での波力の緩和、遊水室による消波効果の発揮を狙った構造である。

これについても水理模型実験を行っているが約 50% のエネルギーが消費され、波力も通常ケーソンよりはるかに小さくなり、かつ基部ケーソン上面を含めた上部構造には下向きの鉛直波力が作用する

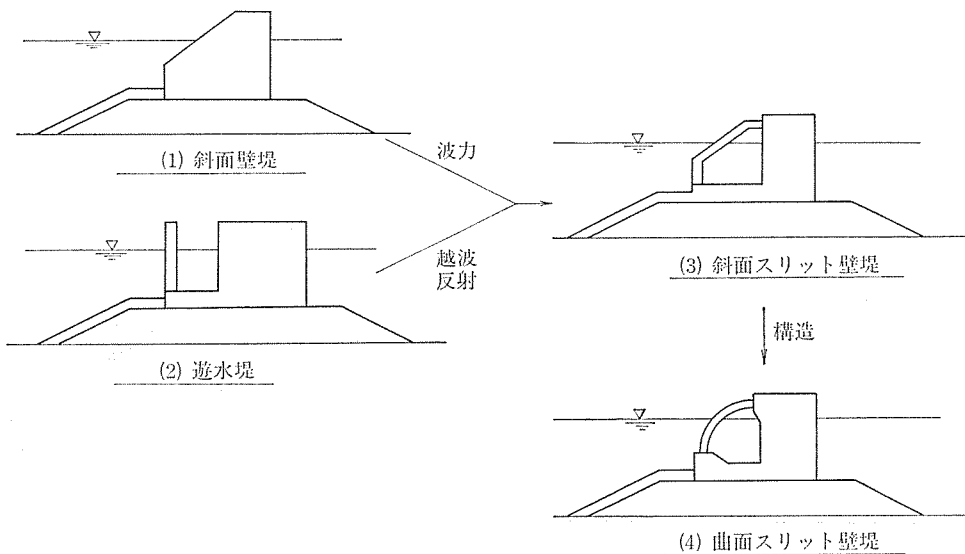
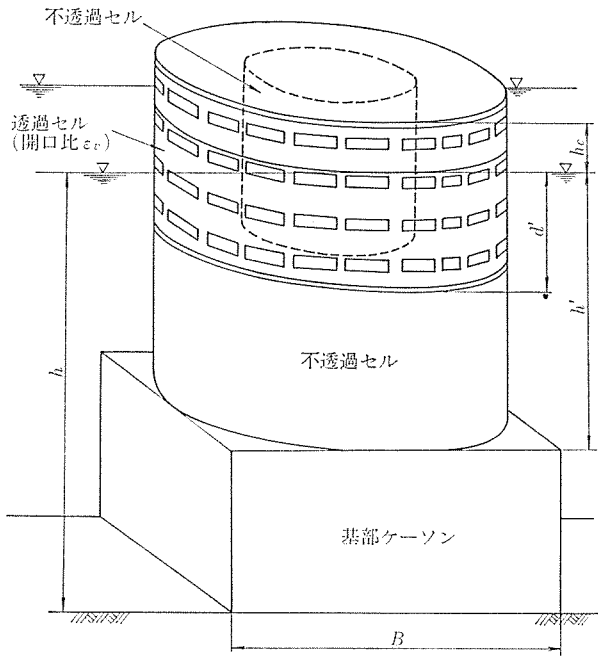


図-9 曲面スリットケーソンのアイデアへの経緯

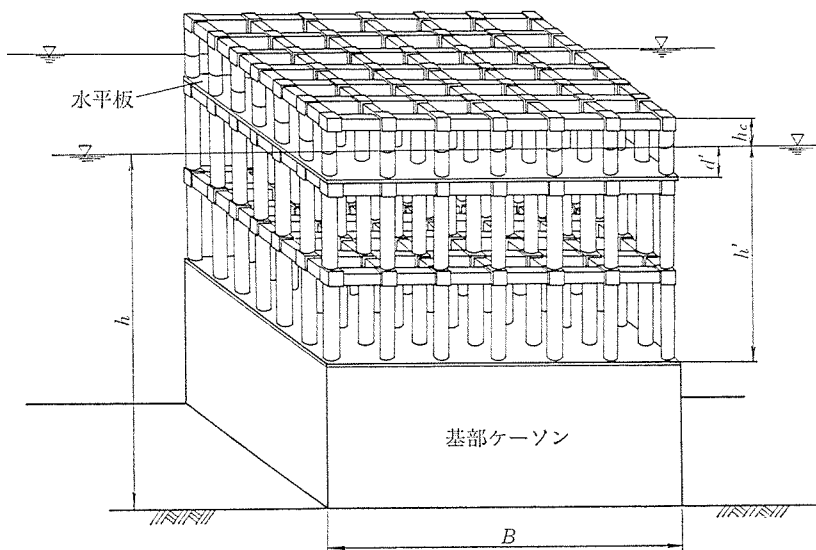


図—10 透過壁式二重セル構造 (模型実験)

ことが明らかになっており、将来有望な構造と言える。

5. 海水を遮断しない防波堤構造

これまで防波壁が水深方向に伸びる構造について述べたが、海水を全く遮断しない防波堤構造も考えられる。その典型的例が水平板式防波堤と言われるもので、海中に水平板を固定したものである。これによって、海水は上下に二分されるけれども、鉛直壁がないため潮流等の流れはほとんど阻害されず、かつ水平波力はほとんど働かないという特長がある。この構造の防波原理は波の粒子運動を水平板で制約することによって水理学的な防波壁を形成することであり、ある周期の波に対して設置深さと幅を適切に選定すれば、理論的には比較的狭い幅で



図—11 水平板付き立体骨組構造 (模型実験)

波を完全に遮断することができるようである¹⁰⁾。しかし現実には様々な周期が混在する不規則な波であるので、完全に遮断することは、無理であることはいままでもない。

こうした水平板の防波原理を応用したものとして、図—11 に示した水平板付き立体骨組構造について水理模型実験を行ってみた。これも波浪制御構造物の一形式として考えたもので、水深 50 m で水平板の幅が 50 m、設置深さが静水面下 3.8 m のとき、有義波周期が 14 秒以下の波に対して透過率 (入射波の波高に対する透過波の波高の比) を 0.4 以下にすることができる。また、波力は非常に小さく、水平板に働く上下方向の波力は等分布強度に換算して波高相当の水頭 ($w_0 H$, w_0 : 海水の単位体積重量, H : 波高) の 0.3 倍以内であることが確認されている。そのため、構造物全体としての安定性は基部ケーソンに中詰めをしないで水張りのままとしても充分確保できるけれども、水平板を支える部材の強度確保が問題で、現在の技術では工費が安くないという難点がある。

6. むすび——波との闘いから利用へ——

以上、外海の第一線にあって波と闘う防波堤の構造について述べたが、防波堤の構造は波を力強くはね返す形式から、波を柔らげて受ける、あるいは波の力を安定性に利用する形式へと移りつつあると言える。これと同様な効果はまた波のエネルギーを他のエネルギーへ変換利用することによっても達成することができる。たとえば、現在研究開発中の波力発電ケーソン¹¹⁾ はそうであり、波のエネルギーを電力エネルギーに変換利用することによって、防波堤自体に働く波力が緩和されるとともに前面への反射波も小さくなる。まさしく、本文で述べた消波ケーソンと同じである。今後こうした防波堤の活用策を考えていくことも重要である。

参考文献

- 1) たとえば、君島八郎：海工，上巻，丸善，pp. 153~209, 1936.
- 2) Lundgren, L.: A new type of breakwater for exposed positions *The Dock and Harbour Authority*, Vol. 43, No. 505, pp. 228~231, 1962.
- 3) Colleran, R.J. and T. Leonard: Harbour extension in Libia, *The Dock and Harbour Authority*, Vol. 50, No. 585, pp. 104~106, 1969.
- 4) 森平倫生・国田 治：斜面壁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, 1979.
- 5) 伊藤喜行: 特殊防波堤論, 水工学シリーズ, 68-06, 土木学会水理委員会, 1968.
- 6) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木論司: 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 卷, 第 2 号, pp. 41~74, 1981.
- 7) たとえば, 黒田静夫・内林達一・櫻部 保・金子 柁: 河海工学, アルス, pp. 89~106, 1942.
- 8) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・鈴木論司: 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 卷, 第 4 号, pp. 3~53, 1980.
- 9) Jarlan, G.E.: A perforated vertical wall breakwater, *The Dock and Harbour Authority*, Vol. 41, No. 488, pp. 394~398, 1961.
- 10) 田淵幹彦・滝川 清: 離岸潜堤の消波機構に関する一考察, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 367~371, 1981.
- 11) 小島朗史・高橋重雄・合田良実: 波力発電 ケーソン 防波堤の水理特性, 第 1 回波浪エネルギー利用シンポジウム, pp. 163~173, 1984.

◀ 刊行物案内 ▶

PC 構造物 最近の設計例と未来像

本書は、全国七都市で開催された第 12 回 PC 技術講習会のテキストとして編纂したもので、下記に示すとおり、PC に関する世界的な傾向を示すアウトケーブルによる PC 橋の設計例、および PC 構造物の曲げ靱性の改善方法、更には我が国内で近年盛んに利用されるマイコンによる PC 橋の設計方法、国鉄の新しい設計標準による PC 橋の設計例、また建設省の調査によるコンクリート橋の塩害問題等、いずれも PC 関係者にとって身近な問題を幅広く取りあげてまとめてあります。PC に関係のある技術者ならば、一度は読んでおく必要のある資料と考えます。

ご希望の方は、代金を添えて (社) プレストレストコンクリート技術協会宛 お申し込みください。

体 裁: A 4 判 123 頁

定 価: 3 500 円 送 料: 450 円

内 容: (A) PC 橋にアウトケーブルを用いた設計例 (終局限界状態安全度検討法に関する規準, 終局曲げ破壊時 PC 鋼材引張応力度, アンボンド PC 鋼材を用いた部材断面曲げに関する設計法, 永久加重作用のもとでひびわれ発生のある部材断面の検討, 試設計例)。(B) PC 構造物の曲げ靱性改善 (構造物の破壊時たわみ靱性の要求, 鉄筋係数の制限, コンクリートの圧縮靱性改善とその効用, 横拘束によるコンクリートの圧縮変形能力改善, 同部材の曲げ靱性改善)。(C) マイコンを利用した PC 橋の設計 (マイコン概論, マイコンの利用方法, PC 橋におけるマイコンの利用, その他の利用)。(D) 新設計標準による PC 橋設計例 (I. PC I 型桁の設計計算例, 主桁の断面決定, 材料の許容応力度, 設計の手順, 曲げに対する部材の設計, せん断に対する部材の設計, 横方向の検討。II. PRC 桁の設計計算例)。(E) コンクリート橋の塩害について (コンクリート中の鋼材の腐食, コンクリート橋の塩害の状況, その塩害対策)。