

消波ブロック内蔵双胴型ケーソン堤の開発

Development of Block-embedded Double-box type Caisson

馬場孝博*・菊地身智雄**・奥田 薫***・豊田裕作****

Takahiro.Baba, Michio.Kikuchi, Kaoru.Okuda and Yusaku.Toyota

The 5th District Port Construction Bureau, Ministry of Transport has been developing Block-embedded Double-box type Caisson adapted for the deep-sea (-40m) and the large waves ($H_{max}=16m$) at the baymouth of Shimoda Port.

As compared with the caisson covered with wave dissipating blocks in the deep-sea, this caisson saves many blocks, but it has the similar characteristics of wave reflection and transmission. However, in order to keep the stability of embedded blocks, it is necessary to make the upper blocks of heavy concrete. Besides, the stress caused by highest wave is so large in some members of the caisson that it is necessary to use steel-concrete composite hybrid members.

Keywords: embedded blocks, double-box type, heavy concrete, hybrid members

1. はじめに

近年の港湾整備は、より質の高い港湾空間を目指したものとなっており、静穏な水域を創造するために建設される防波堤についても、より高い稼働率の確保や十分な静穏水域の確保のため、ますます厳しい自然条件の下でその建設が行われるようになってきている。特に、大水深海域においては巨大波浪を制御するため堤体の大型化を招き、建設コストも莫大なものとなる。従って、十分な耐波性能を有しつつ、より経済的に整備できる防波堤構造が求められている。今回紹介する消波ブロック内蔵双胴型ケーソンは、下田港湾口防波堤深部の構造として、運輸省第五港湾建設局において開発を進めてきているものである。現在のところ、現地着工には至っていないが、基本的な構造については概ね検討が終わっている。今回は、現在までに実験等による検討によって明かとなった技術的課題の説明を中心として、消波ブロック内蔵双胴型ケーソンのアウトラインについて紹介することとしたい。

2. 下田港湾口防波堤の概要

(1) 下田港湾口防波堤整備の目的

下田港は、江戸時代から東西日本を結ぶ海上交通の要衝として利用されてきた。特に荒天時には周辺海域に適当な避難場所がないため避難港として利用されてきており、昭和26年には港湾法による避難港の指定を受けた。また、下田港とその背後の市街地は過去幾度も津波被害を受けており、特に安政地震(1854年)の津波では死者122名にも及ぶ甚大な被害を受けている。さらに、近い将来マグニチュード8程度の地震の発生が予想されている。このため、下田港において避難港の機能強化と津波対策を兼ねた避難港防波堤の整備に昭和60年度より着手している。

(2) 防波堤建設に係る技術的課題

防波堤が建設される海域の自然条件は、深部において水深-40m、設計波浪が $H_{1/3}=9m$ 、 $H_{max}=16m$ 、 $T_{1/3}=17.4$ 秒と極めて過酷な条件となっている。このため、設計にあたっては、克服すべき数多くの技術的課題が挙げられた。その主なものは、

- ① 経済的な断面
- ② 優れた消波機能
- ③ 十分な耐波安定性、等であった。

経済性については、大水深(-40m)となるため、通常の消波ブロック被覆堤では、捨石マウンドや消波ブロックの量

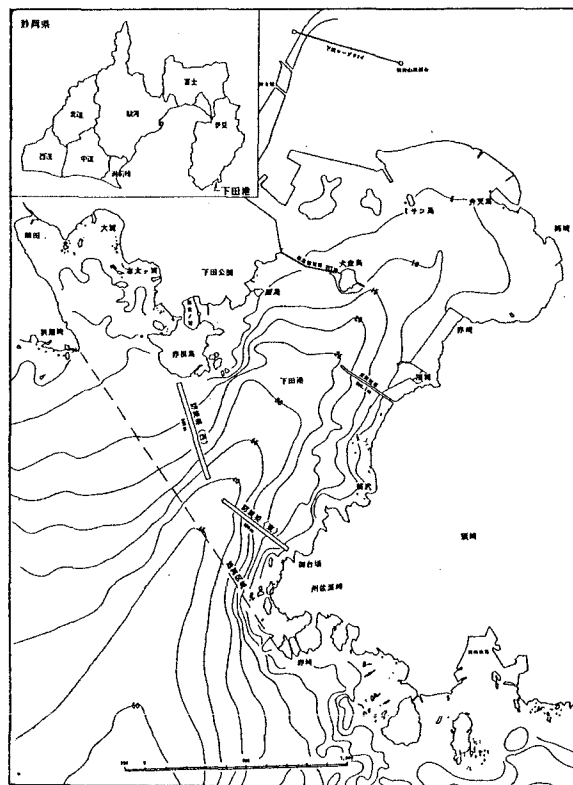


図-1 下田港平面図

* 正会員 運輸省第五港湾建設局 設計室長 (455 名古屋市港区築地町2番地)

** 正会員 (前) 同 設計室 建設専門官 *** 正会員 同 設計室 工事専門官

**** 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所 水理研究室 室長代理

が莫大なものとなり、工費が非常に増大してしまう。このため、経済性の観点からは、直立消波型ケーソンと同程度の工費に抑える必要があった。

消波機能については、できるだけ幅広く周期の長い波から短い波まで、さらに斜め入射波に対しても十分な消波機能を有することが求められた。そのため、従来の直立消波型ケーソン堤では必ずしも消波機能が十分ではないため、新たな消波機構を考案する必要性が生じた。

耐波安定性については、波高も大きく、周期も長いため、巨大な波力に対して効率的に抵抗する構造としなければならない。そのため、波力や消波機構自体を滑動抵抗に利用するといった構造上の検討が必要となった。

これらの条件を十分に満足する構造形式として、種々の構造が提案、検討されたが、最終的に最も合理性の高い構造として消波ブロック内蔵双胴型ケーソンが提案された。

3. 消波ブロック内蔵双胴型ケーソンの各種特性

消波ブロック内蔵双胴型ケーソンは図-2に示すように、前柱と後壁（これにより双胴型と名付けられている）の間の遊水部に、消波ブロックを内蔵した構造となっている。

消波ブロック内蔵双胴型ケーソンは、その形状、構造から次に掲げる特徴を有している。

- ①消波ブロックを内蔵しているため、消波ブロックの重量が堤体の滑動抵抗として利用できる。
- ②消波機構については、内蔵される消波ブロックによる波エネルギーの消費と、前柱と後壁による双胴間位相差による反射波低減の両方が期待でき、消波ブロック被覆堤と縦スリットケーソンの双方の長所を有した構造となっている。
- ③前面上部がスリットの形状となっていることと、前面上部が傾斜しているため、水平方向波力を低減させ、傾斜部においては鉛直波力が期待できる。

以下ではこれらの諸特性について実験データ等を交えつつ個別にみていくこととする。

(1) 反射・伝達特性

図-3は開口比（ ϵ ）と反射率（ K_R ）の関係を示したものである。これによれば、開口比が増加するほど反射率が低減していることが分かる。

図-4は周期（ $T_{1/3}$ ）と反射率（ K_R ）の関係を遊水部水深別に示したものである。これから、周期については10秒以下の波に対して反射率が小さく抑えられていること、また、遊水部水深は-5m以深で十分実用化できることがわかる。

図-5は $H_{1/3}/L_{1/3}$ と反射率（ K_R ）及び伝達率（ K_T ）の関係を示したものである。これより、波高の大きい波から小さい波まで、さらに周期的にも比較的広範囲な領域で安定した反射特性を有していること、及び設計波に近い波高及び周期領域の波浪に対して伝達率も十分小さく抑えられることがわかった。

図-6は斜め方向から波を入射させた（入射角 $\beta=60^\circ$ ）ときの反射率（ K_R ）を示したものである。通常、縦スリットケーソンの場合には斜め入射時の反射特性は直角入射時よりもかなり悪化することが知られている。しかし、双胴型ケーソン

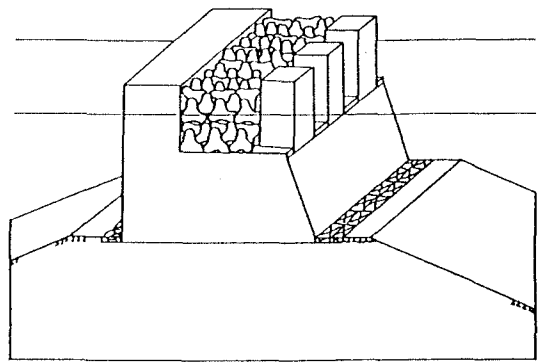


図-2 消波ブロック内蔵双胴型ケーソン

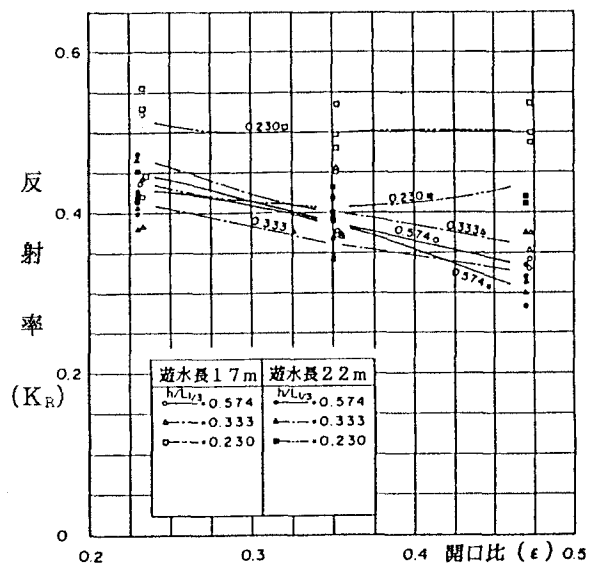


図-3 開口比（ ϵ ）～反射率（ K_R ）

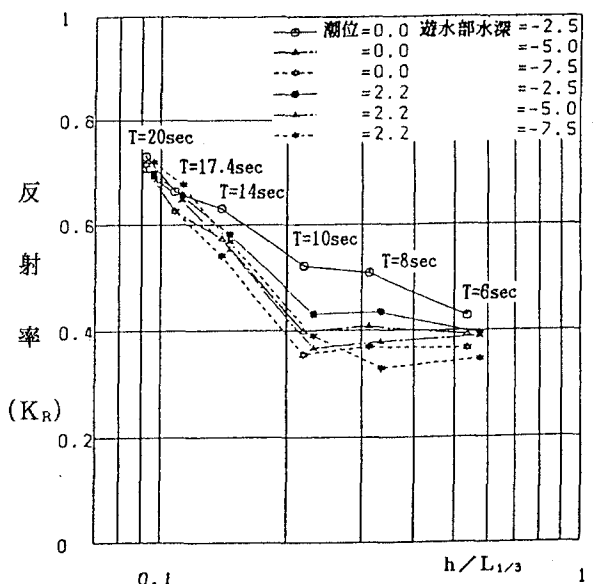


図-4 周期（ $T_{1/3}$ ）～反射率（ K_R ）

ンの場合は、前柱がスリットの形状となっているにもかかわらず、直角方向入射時と同等の反射特性を有していることがわかる。これは、双胴型ケーソンにおいては、前柱と前柱の間隔が広いので、波が遊水部に進入しやすく内蔵ブロックでのエネルギー消費が消波機構の主たる要因であるためと考えられる。

これらの水理実験の結果より、双胴型ケーソンは、反射・伝達特性については消波ブロック被覆堤なみの優れた特性を有した構造形式であるといえる。

(2) 波力特性

双胴型ケーソンは、次に示す3つの位相における波力特性が堤体の安定性を検討する上で基本となる。すなわち、

①波の峰が前柱に到達した時点（押波Ⅰ）

これは、滑動合成力のピーク時に相当する。

②波の峰が後壁に到達した時点（押波Ⅱ）

これは、後壁に作用する波力のピーク時に相当する。

③波の谷が前柱に到達した時点（引波）

の3位相である。

水理模型実験の結果から、押波Ⅰ、押波Ⅱにおける波圧強度分布は合田式により求められる波圧 P_0 に係数を乗じた形で与えられることがわかった。（図-7及び図-8参照）この結果から、同じ設計条件下で設置される消波ブロック被覆堤と比べてみると、双胴型ケーソンの堤体に作用する水平方向波力は消波ブロック被覆堤の0.76倍に低減されることがわかる。

(3) 内蔵ブロックによる荷重

双胴型ケーソンは、消波ブロックを内蔵しているため、内蔵ブロックによる土圧的な荷重についても考慮する必要がある。模型実験の結果によれば、ブロック荷重は図-9に示すような台形分布と仮定できる。

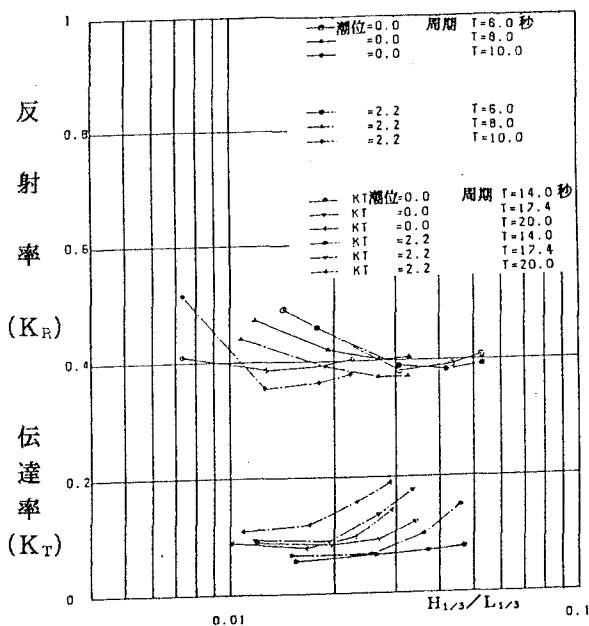


図-5 $H_{1/3}/L_{1/3}$ ～反射率(K_R)、伝達率(K_T)

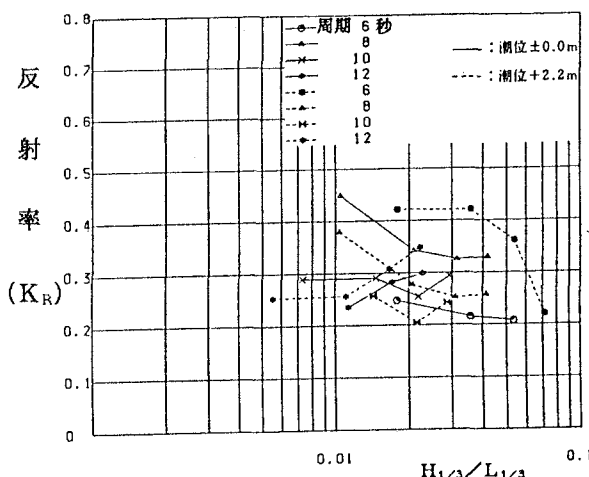


図-6 $H_{1/3}/L_{1/3}$ ～反射率(K_R) ($\beta=60^\circ$)

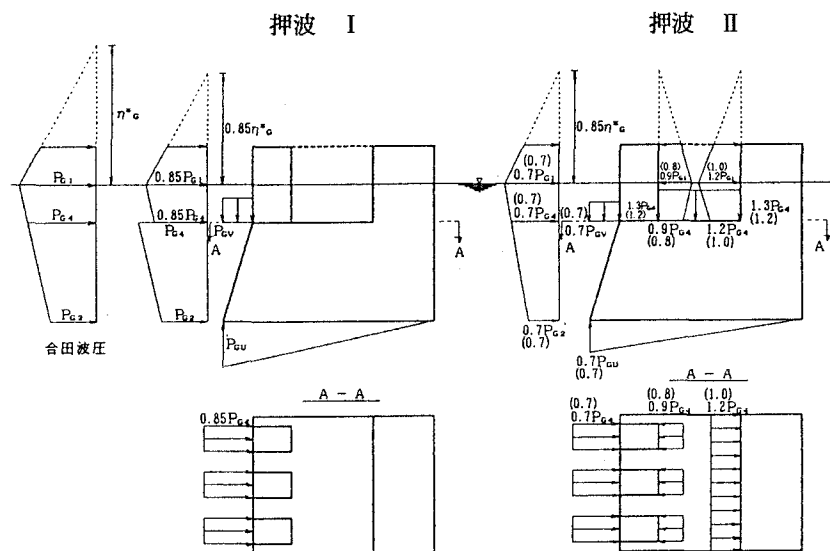


図-7 波力特性（押波Ⅰ）

図-8 （押波Ⅱ）

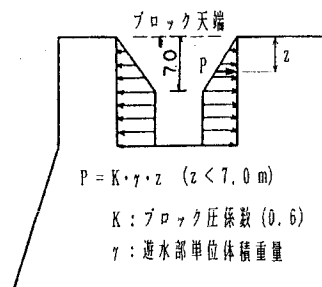


図-9 ブロック荷重の分布

4. 構造設計等の対応

前述のように、消波ブロック内蔵双胴型ケーソンは、様々な優れた特性を有しておりその早期実現が望まれているが、そのためには解決すべきいくつかの課題がある。

(1) 内蔵ブロックの問題

双胴型ケーソンに内蔵する消波ブロックの諸元については通常の消波ブロック重量算定公式（ハドソン式）を用いることができないため、その決定方法について検討する必要がある。このため、水理模型による内蔵ブロックの安定実験等による検討を行ってきており、現在まで以下のことが明らかになっている。

- ①内蔵ブロックのうち、波浪に対し安定性が問題となる（移動、動揺が発生する）のは上層部のみであり、中、下層部は十分安定である。
- ②内蔵ブロックの上層部については、通常より比重の大きいブロックを用いる必要がある。

図-10は、日本テトラポッド(株)との共同研究の実験結果を、 $H_{1/3}$ と被害率及び動揺率の関係について示したものである。ここで、被害とはブロック長以上の移動をいい、動揺とはブロック長以下の動きをいう。

これにより、ブロックの大きさが一定でも、比重を大きくすることによって安定性を十分確保できることがわかる。

(2) 部材の構造設計問題

消波ブロック内蔵双胴型ケーソンは、後壁及び前柱の基部、遊水部底版、隔壁等が構造上の弱点となっている。特に後壁及び前柱は、近似的に片持梁形式となっており、一部の部材、特に接合部付近に大きな応力が発生することが構造解析により明らかとなっている。（図-11）

このため、鉄筋コンクリート（RC構造）以外に、鋼・コンクリート合成構造（ハイブリッド構造）についても構造検討の対象とした。検討の結果、図-11に示すように、双胴型ケーソンの構造として一部をハイブリッド構造とすることが、以下の点で合理的であることがわかった。

- ①高強度となり、通常の部材厚で発生応力に十分対応できる。
- ②部材のスリム化が可能のため、ケーソン全体重量を軽減できる。
- ③主に後壁部が計量化されるため、ケーソンの偏心を緩和できる。

5. 今後の課題

(1) 部材の強度確認

部材構造として、ハイブリッド構造を導入することが合理的であることがわかったが、ハイブリッド構造の海洋構造物への適用実績は少なく、また、本ケーソンのような接合部を持つ構造への適用事例もほとんどない。したがって、双胴型ケーソンへのハイブリッド構造の採用にあたっては、構造強度の確認のための実験等を今後行っていく必要がある。

(2) 防波堤の景観

双胴型ケーソンの設置が予定されている下田港周辺海域は、富士箱根伊豆国立公園に指定されている景勝地であり、年間 600万人を超える観光客が訪れるわが国有数の観光地の一つでもある。双胴型ケーソンは、海中から突き出す前柱が規則正しい連続した景観を創出する構造となっており、こうした独特の景観を上手く活かしつつ周辺の優れた豊かな自然とも十分に調和のとれたものとして整備していくことが重要であり、その具体的方策についての検討を進める必要がある。

6. おわりに

下田港は、過去幾度も津波被害を受けたところであり、津波対策に対する地元の期待も大きいことから一日も早い湾口防波堤の完成が望まれており、そのためにも残された課題の一つ一つを着実に解決し、双胴型ケーソンの実現を図っていく必要がある。

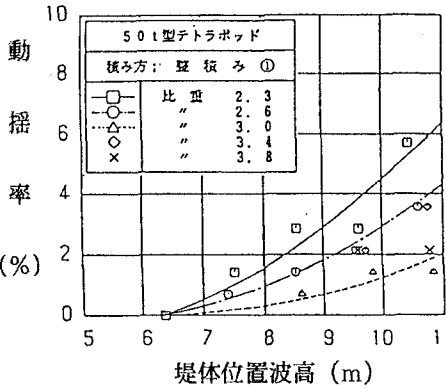
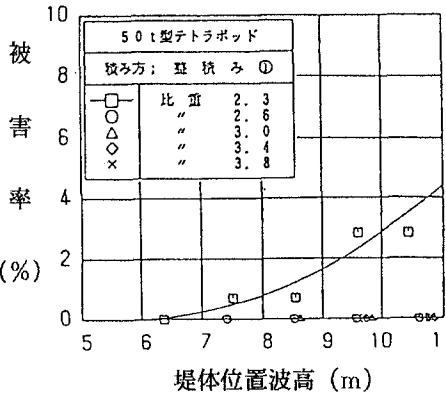
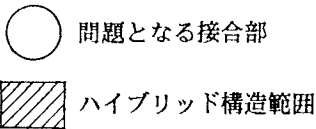


図-10 $H_{1/3}$ ～被害率、動揺率



(その他はRC構造)

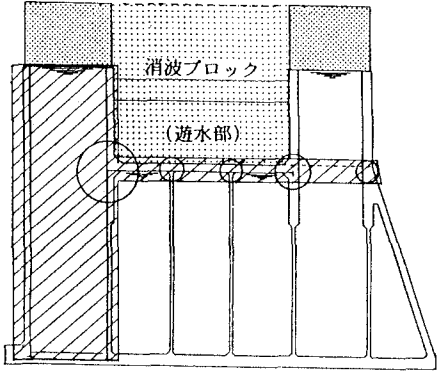


図-11 双胴型ケーソン構造概要