

(45) 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

DESIGN AND CONSTRUCTION OF DOUBLE-WELL SEMI-CYLINDRICAL CAISSON BREAKWATER AT FUKUI PORT

田端竹千穂* 北山 優* 藤井 敦* 梅木 功* 米倉宏司*

By Taketiho TABATA, Masaru KITAYAMA, Atsushi FUJII, Isao UMEKI and Kozi YONEKURA

Recently, as breakwaters are constructed in deeper sea area against higher waves, they are required to dissipate waves more efficiently as well as to be constructed more easily and economically.

It has been common to construct breakwaters with wave-dissipating blocks in such locations. However, especially at the breakwater head, necessary wave-dissipating blocks tend to be larger and more expensive.

In this report, development and construction of Double-Wall Semi-cylindrical Caisson Breakwater are presented.

This Caisson is a composite of steel and reinforced concrete and has effective dissipating function and can be constructed economically.

1. はじめに

外海に面した第一線防波堤は設計波高が大きくなることにより、消波ブロック被覆堤の設計においてはブロック重量が50tを超える大型のものが必要となっており、経済的に高価となり施工性も悪化する傾向にある。

福井港の防波堤（南）の改良工事においても、従来の断面で設計を行うと、堤頭部の消波ブロックによる補強に80tブロックという大型ブロックが必要となり非常に高価となるため、低反射機能を有する堤頭部の補強のための技術開発が求められていた。そこで、二重円筒ケーソン防波堤の低反射特性と施工性に着目し、堤頭部の被覆補強に利用するためのケーソン（二重半円筒ケーソン）の開発を行った。（図-1参照）

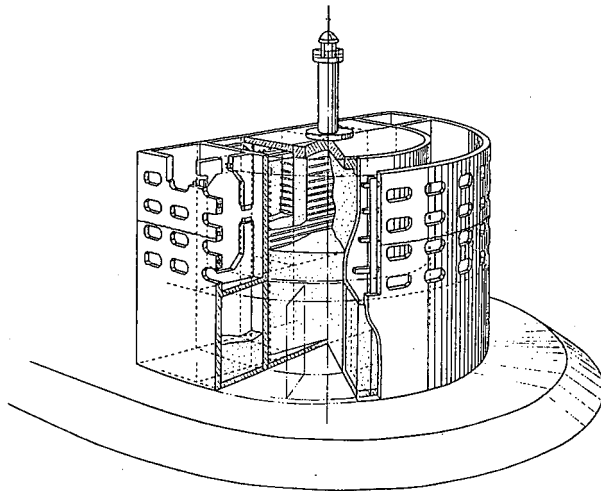


図-1 二重半円筒ケーソンの鳥瞰図

* 運輸省 第一港湾建設局 新潟調査設計事務所

2. 施設への要請と自然条件

二重半円筒ケーソンが設置されている福井港防波堤（南）は、図-2に示すように福井県の北に位置し、福井港の第一線防波堤で港口にある。

本防波堤は、日本海側の厳しい冬期風浪により防波堤の前面が洗掘を受け、設計時の水深よりも深くなっており、堤体の滑動に対する安全率が1.2以上¹⁾を確保できない状況である。このため、消波ブロックにより堤体の前面を被覆する改良工事が行われており平成7年4月現在で堤頭部付近を残すのみとなっている。

防波堤の堤頭部を消波ブロックで被覆する場合、通常の設計ではブロックの所要重量は、標準部よりも1.5倍以上¹⁾の割増の80t級のものの必要となる。しかも、従来型の改良断面では堤体の先端部を取り囲む形状となるため、多数のブロックが使用されることから多大な投資が必要となる。

このため、従来にないより経済的な構造の開発が求められた。

そこで、高波浪海域でも構造的に安定で、しかも消波効果が十分期待できる二重円筒ケーソン防波堤の水利特性と施工性に着目して、消波構造のケーソンとして堤頭部の被覆に利用する二重半円筒ケーソンの開発を行った。なお、設計法については、運輸省港湾技術研究所及び第三港湾建設局で行った二重円筒ケーソンの水利特性に関する実験報告^{2), 3)}等を参考として検討した。

本防波堤の設計条件は、設計水深が -17.5 m 、海象条件の設計潮位は $\text{H.W.L}+0.5\text{ m}$ と $\text{L.W.L}\pm 0.0\text{ m}$ 、設計波浪は堤体の安定計算では受圧面積の大きい波浪である入射角 33° 、有義波高 8.5 m 、周期 13 秒 を用い、部材の設計では部材応力が最大となる入射角 23° 、有義波高 8.9 m 、周期 13 秒 の波を用いた。土質条件は $\phi=35^\circ$ の砂質土であり、日本海側では一般的な土質である。

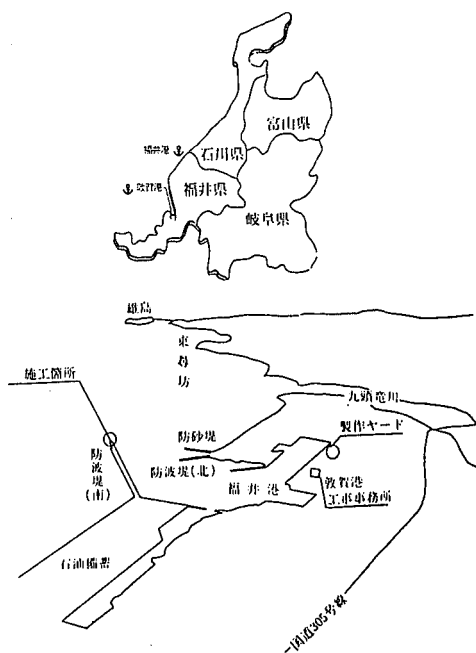


图-2 位置图

3. 設計上の課題とその対応

二重半円筒ケーソンの設計上の課題は、その形状・構造の決定と施工法の検討である。(図-3 参照)

課 題	対 応 方 針
消波機能と反射率の検討	→ 遊水部の長の決定
部材応力の検討	→ FEMによる構造解析
施工制約条件の検討	→ PC構造とハイブリッド構造

図一 3 課題と対応方針

形状・構造の決定にあたっては、二重円筒ケーソンの実験結果を参考として検討した。

ケーソンの大きさについては、既設防波堤に連続的に取り付けられる形状とし、波力に対しても十分に安定性を確保できる大きさとした。

遊水部の形状は実験等の蓄積がある二重円筒ケーソンのプロポーシヨンに近いものとなるよう設定した。

この結果、二重半円筒ケーソンの形状は図-4に示す二重の半円筒に一部矩形のスリットケーソンが付いた形状となった。

部材の検討では二重円筒ケーソンよりも複雑な形状となることから部材の安全性の確認が必要となり場合によっては部材の補強を行うことも想定された。そこで、有限要素法により部材応力の検討と補強方法の検討も行うこととした。

また、施工法の検討については、近くに大きなケーソンヤード施設がないこと、海上打継ぎを行う場合はケーソン喫水が -7.5 m 以浅の場所しかないこと、大型の起重機船が容易に用船できないこと、製作が1函だけであり、特殊な形状をしてること等、施工上配慮する事項が多く存在した。このため、現地での施工性のよい構造を検討することとなり、PC構造とハイブリッド構造とを比較することとした。

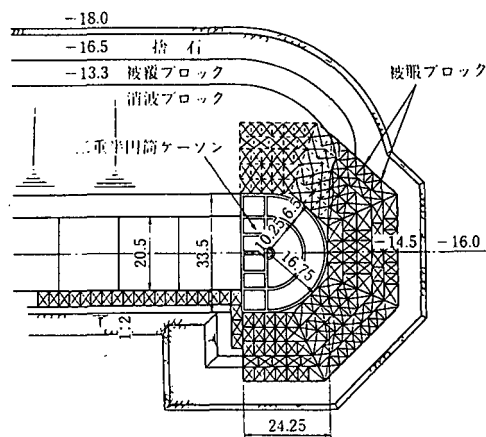


図-4 堤頭部平面図

4. 遊水部の長さや反射率の検討

遊水部の長さは、外円筒と内円筒の比、直立消波ケーソンでの遊水部の設計実績、据え付け形状のバランス等を考慮し 6.5 m とした。また、反射率は従来の消波ブロックでは 0.4 程度であるが、二重半円筒ケーソンでは実験等から $0.4 \sim 0.6$ 程度²⁾の範囲にあると考えられる。

5. FEM解析と施工法の検討

(1) FEM構造解析

FEMによる構造解析では、基本設計時に、特に大きな応力が予想される中間床版よりも上のスリット面を取り出して概略の解析を行い、主要な補強材の検討を行った。また、詳細設計時には、構造全体の解析を行った。

ここでは、基本設計時に行った概略の解析結果について説明する。

まず、上部(遊水部)の部材にとって最も厳しい波力は、波浪が遊水部の中に打ち込んだ時に生じる最大波力のパターンであり、このときの波力は図-5のようなパターンとなる。

この波力に対して、各部材の応力分布を検討した結果、円筒部と直線部の境界付近に大きなモーメントと引張力が生じることが明らかとなった。このため、この部分に中央に穴のあいた隔壁構造の補強を行うこととした。補強構造がない場合とある場合の外円筒面に生ずるモーメント分布等を比較すると、図-6のようになる。

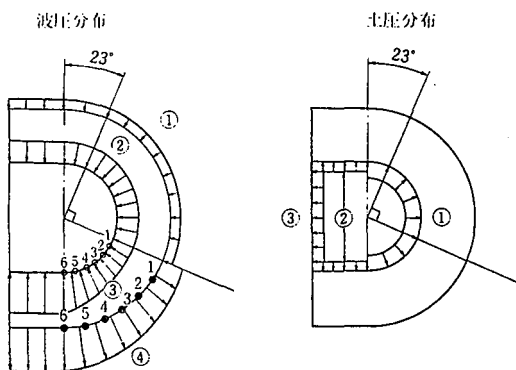


図-5 波力パターンとFEMによる構造形状

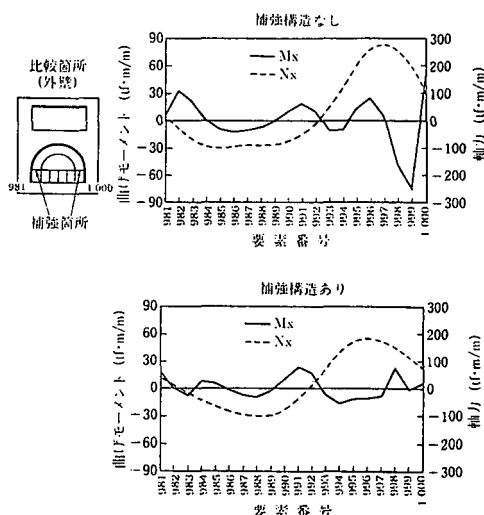


図-6 モーメント分布の比較

(2) 施工法の検討

F E Mによる部材力の概略検討の結果、通常のR C構造では、部材断面が巨大となり構造的に成り立たないことが明らかとなったため、P C構造とハイブリッド構造とを施工面から比較検討することとした。

最重要課題である現地での製作条件であるが、現地打継ぎ場の喫水が-7.5mと浅いため、P C構造とした場合の喫水が-11m程度となることから、ケーソン製作後に起重機船により吊り上げて喫水を確保する必要があるが、3,000t級起重機船で吊り上げても-7.5m程度の喫水しか確保できないため、かなりのリスクを伴う施工となることが明らかとなった。ハイブリッド構造では、喫水が-7.5 m程度に収まるため、喫水についての問題は無い。

また、ハイブリッド構造は特殊型枠の量が少なくすむこと、コンクリート強度が通常のR Cケーソンの場合と同程度であり品質管理が容易であること、そして、万一消波ブロック等の衝突によりケーソンの一部が破損した場合でも構造物全体の崩壊につながる可能性が少ないこと（P C構造の場合、P C鋼材の定着部が破損すると構造全体に影響を及ぼす）等設計・施工上有利な点が多いため、ハイブリッド構造を採用することとした。なお、ケーソン製作から据付けまでの各工程は図-7のように施工を行った。

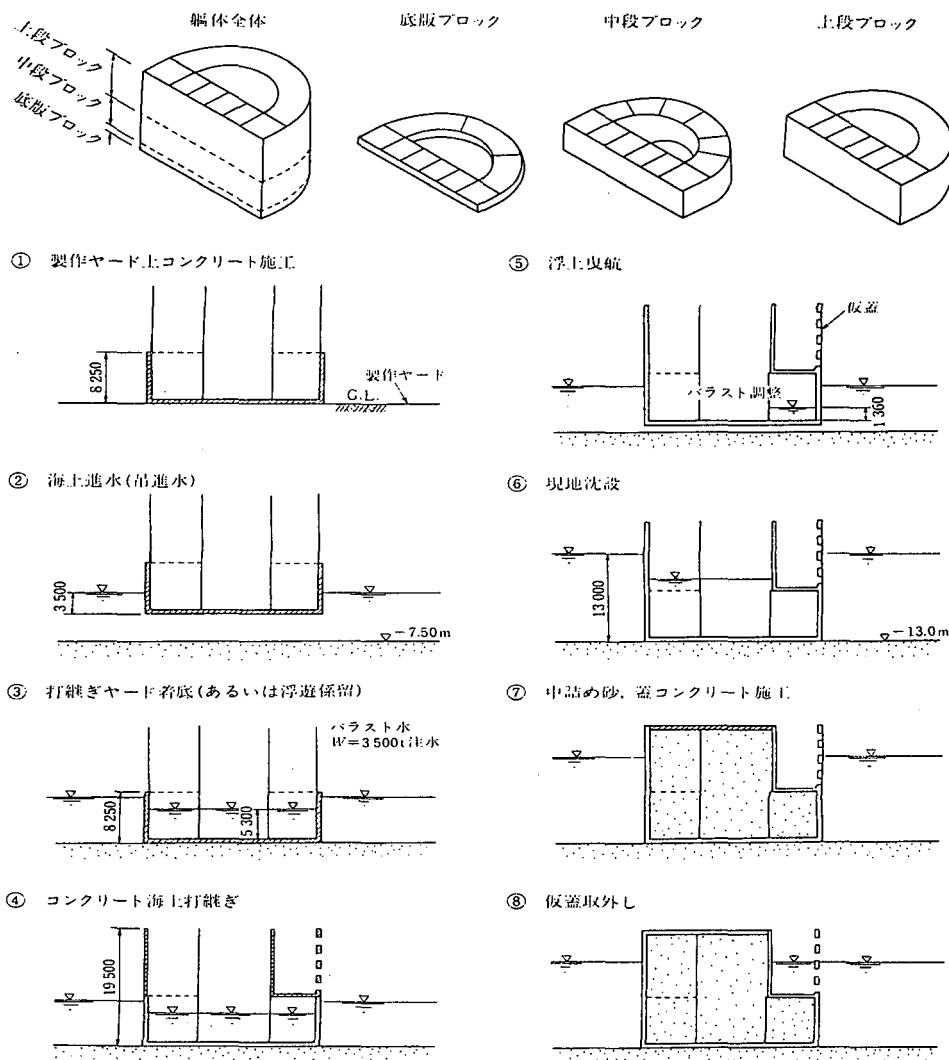


図-7 施工工程

6. 施工上の検討課題

二重半円筒ケーソンの製作では、施工上今まで行っていない新たな検討を行う必要がある。一つは、外円筒下部の中詰め砂の投入方法である。二重円筒ケーソンの施工実績では中間床版の上からスラリー状にした砂をポンプにより圧送していたが、当海域では波浪により外円筒の中の水の乱れが激しいと考えられるため、この方法は適さないものと判断された。

そこで、ハイブリッド構造の特徴を生かして、内円筒と外円筒間の隔壁に穴をあけて、そこから中詰め砂を流し込む方法をとることにした。これにより施工時の安全性や施工効率が著しく向上するが、一方では確実に中詰め砂の充填ができるかが問題となる。そこで現地事務所で模型を用いた中詰め砂の投入実験を行い自然投入した場合と潜水ポンプやウォータージェットを用いた場合について比較検討した。

(図-8 参照)

その結果、潜水ポンプまたはウォータージェットを用いることで確実な充填ができることが明らかとなったことから、施工効率を含めた詳細な検討を行い実施した。

いま一つの施工上の問題点は、ケーソン外壁部鋼殻の製作精度についてである。外壁鋼殻は工場で鋼殻ピースとしてケーソン全体で24ピース製作されるが、その精度を $\pm 2\text{ cm}$ としている。これに対して現地で鋼殻を組み立てる場合の精度は、従来のケーソン製作基準⁴⁾どおり $+3\text{ cm}$ 、 -1 cm となっているため、鋼殻ピースが多くなると製作誤差が累積して製作基準を逸脱するおそれがある。そのため、この累積施工誤差を半円筒の円弧部ではなく、直線部の外力のなるべく小さい箇所調整し基準内に入るよう施工した。今後は、このような特殊構造のケーソン製作では、新たな制作基準を設ける必要があるのではないかと考えられる。(構造諸元は図-9 参照)

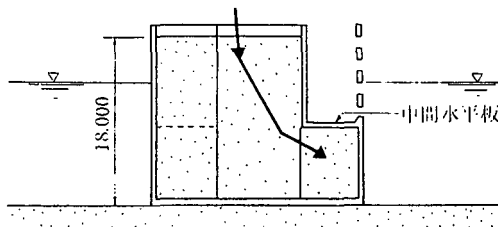


図-8 中詰め砂投入方法

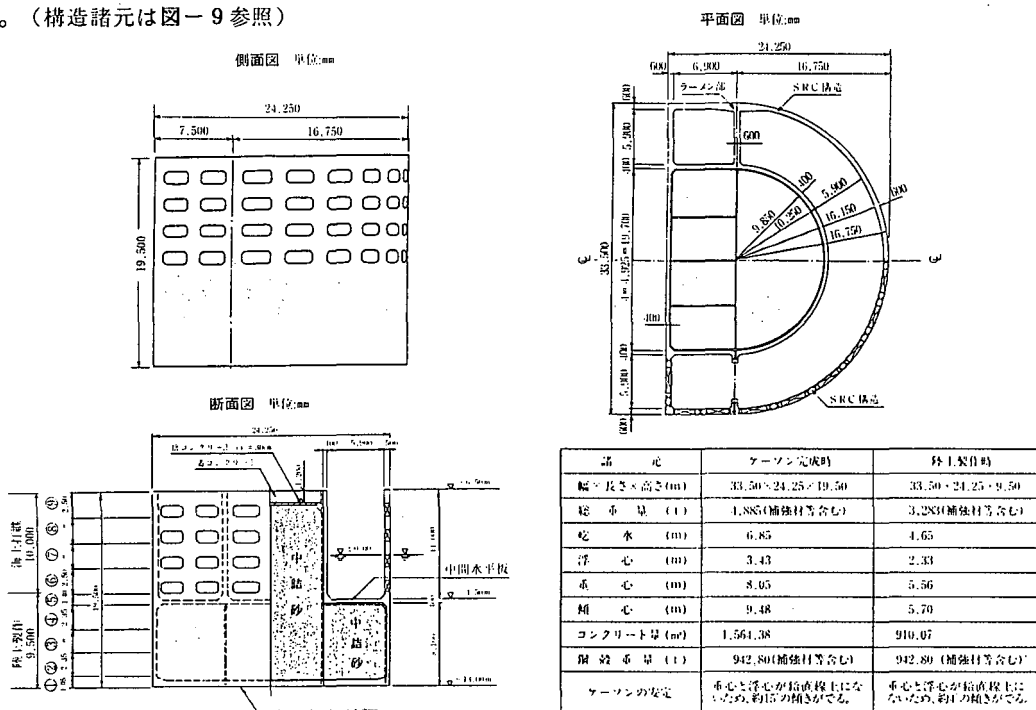


図-9 構造諸元

7. おわりに

防波堤堤頭部の改良において二重半円筒ケーソンを採用したことにより、円構造の面内力を利用したことによる部材の節約及びコストの低減が実現した。

また、その特徴的な形状は港の玄関口である防波堤先端のシンボリックな構造物となり、港全体の景観面でも良好なものであると考えられる。

今後、こうした構造物が機能面、景観面から港の顔として大いに採用されることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・解説，平成元年2月
- 2) 谷本他：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その4）－二重円筒ケーソン（海底設置型）の水理特性と試設計－，港研資料No600，1985
- 3) 谷本他：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－，港研資料No637，1988
- 4) (社)日本港湾協会：港湾工事共通仕様書，平成3年3月