

半没水上部斜面ケーソン堤の開発調査

Development of Semi-Submerged Sloping Top Caisson Breakwater

立田 実*・山谷 弘幸**

TATSUTA, Minoru and YAMAYA, Hiroyuki

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸開発技術研究センター 第一調査部長

Many types of composite type breakwaters have been developed to save total cost. The present paper describes the optimum design procedures for the newly developed semi-submerged sloping top caisson breakwater.

Key Words : semi-submerged sloping top caisson ,economical breakwater , finite element method

1. はじめに

近年，社会資本整備の一環として建設コストの縮減に関する要請が高まっている。港湾施設における防波堤は，外洋からの厳しい波浪を遮蔽して港湾の水域施設，係留施設等の整備に必要な静穏域を確保する重要な働きを有するが，整備費が多く掛かることからコスト縮減に関する要請も強い。

混成堤に代表される典型的な防波堤構造については，これまで設計・施工技術が整備され，多くの施工実績を有している。最近では，大水深化，高波浪化，軟弱地盤等の自然条件の厳しい中での防波堤の建設が求められており，さまざまな新形式防波堤が開発・建設されてきている。

このような背景を踏まえて，国土交通省東北地方整備局からの受託業務として，(財)沿岸開発技術研究センターでは，これまで運輸省が調査した新形式防波堤に関する成果を参考として，経済的な防波堤断面構造に関する各種調査・検討を平成7年度から実施している。平成9年度以降は，ケーススタディとしてK港湾口防波堤をモデル地点とした構造形式として半没水上部斜面ケーソン堤を選定した。平成10年度には水理模型実験および施工性の検討を行い，実証試験堤の試験計画を策定した。さらに平成11年度は実証試験堤の基本設計および詳細設計を行った。

本稿では，平成11年度の実証試験堤の詳細設計における成果を踏まえて，最適防波堤構造断面を対象に，詳細な構造解析法(3次元FEM解析)に基づく断面構造の照査を行い，さらに合理的な構造解析法に関する検討結果の一部について述べる。

2. 半没水上部斜面ケーソン堤の構造概要

半没水上部斜面ケーソン堤は，上部工のみを斜面壁とする上部斜面ケーソン堤に対して，防波堤港外側の斜面壁部をケーソン本体部の水面下まで伸ばした構造である。

平成11年度の調査における最適構造断面図を図-1に，安定計算結果を表-1に示す。

図-1 半没水上部斜面ケーソン堤の最適構造断面図

表-1 安定計算結果

半没水上部斜面ケーソン堤の特徴は，上部工およびケーソン本体部の斜面壁に作用する水平波力の低減と鉛直下向き波力の増大により，堤体断面の縮小が可能である。

3. 構造断面の合理化に関する検討

3.1 平成 11 年度の検討課題

半没水上部斜面ケーソン堤は、ケーソン形状が特殊であることから、詳細設計において通常用いられる「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に記載されている版の計算図表を用いることができない。平成 11 年度の実証試験堤の詳細設計では、斜面壁部に関連する法線平行方向港外側側壁と一部の法線直角方向側壁および隔壁の断面力を FEM 解析によって算定し、構造設計を許容応力度設計法により実施した。

その結果、法線直角方向側壁の一部で大きな断面力が発生し、コンクリートの曲げ応力度が許容値をオーバーする結果となった。これは、ケーソン自体が特殊な形状であることによる施工上の制約から、部材厚や隔壁配置の変更が難しいこと、断面力の算定に版部材の FEM 解析を用いたため側壁・隔壁・底版の接合部等において断面力を大きめに評価していたことなどが要因と考えられた。また、法線直角方向側壁の補強は、ケーソン製作における施工上の手間が増えることになり、半没水上部斜面ケーソン堤の実用化における課題の一つとなる。

3.2 平成 12 年度の検討内容

平成 12 年度は、半没水上部斜面ケーソン堤の合理的な構造断面の検討の一環として、図-1 に示す最適防波堤構造断面を対象として、詳細な構造解析と限界状態設計法による部材設計を行い、適切な構造解析法および詳細設計法の確立に向けての基礎資料とするための検討を実施した。

合理的な構造解析法の検討は、FEM 解析による解析モデルとして以下の 3 タイプについて比較検討を実施した。

- ①全体 3 次元モデル：ケーソン全体をモデル化し 3 次元 FEM 解析
- ②部分 3 次元モデル：半没水上部斜面ケーソンの斜面壁部に関する隔壁部分を取り出してモデル化し 3 次元 FEM 解析
- ③版部材モデル：半没水上部斜面ケーソンの斜面壁部に関連する側壁・隔壁を版部材としてモデル化し 2 次元 FEM 解析

3.3 各解析モデルによる構造比較検討

(1) 全体 3 次元モデルの検討

解析モデルは、ケーソン全体をシェル要素でモデル化した。要素厚さはケーソン部材の厚さを基本とし、要素

分割は既往のケーソン部材の検討例を参考に 400~800mm 程度のメッシュとした。図-2 にモデル図を示す。境界条件は、ケーソン下端のマウント接地面をバネ支承とした。バネ値は鉛直方向バネ値:4900kN/m³、水平方向バネ値:2450kN/m³を用い、ケーソン上端は自由端とした。

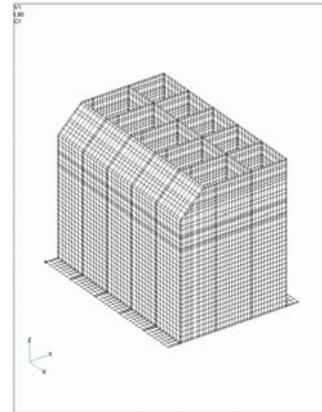


図-2 全体 3 次元モデル図

設計波力は、施工時(非消波型)は細山田・高橋・谷本(1994)の方法¹⁾、完成時(消波型)は従来の上部斜面ケーソン堤の波力式として用いられてきた森平・国田(1979)の式²⁾に消波ブロックによる低減を考慮した方法を用いて算定した。細山田の式は斜面壁部について水平波力と鉛直波力に分けて求められるが、実際の解析では斜面壁直角方向に合成して載荷するものとした。波力の設計荷重の一例を図-3 に示す。

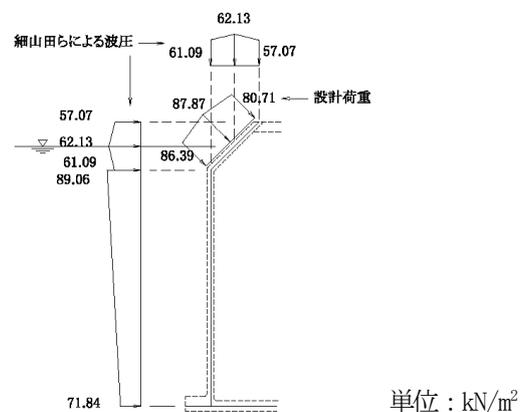


図-3 波力の設計荷重(波の山作用時 H. W. L.)

設計荷重の設定に関しては、考慮される荷重をそのまま載荷する方法と等価の換算荷重に置き換えて載荷する方法があるが、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では版の計算図表を用いることから換算荷重に置き換えることになる。ここでは、荷重ケースとして作用荷重をそのまま設計荷重とした場合と換算荷重を設計荷重とした場合の断面力を比較した結果、半没水上部斜面ケーソンの構造上ケーソン頭部が弱点になることから、荷重の整合性および設計の簡便さを考慮して、荷重の合力位置を

合成荷重と同様にした換算荷重(設計荷重)を用いることとした。換算荷重の求め方の一例を図-4に示す。

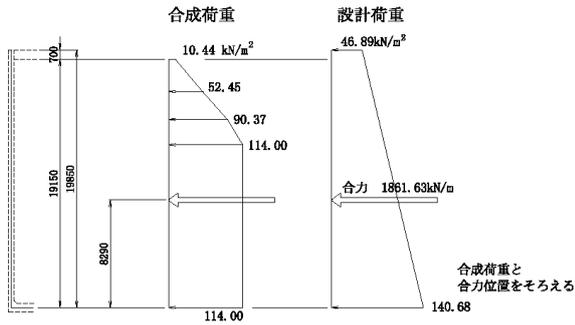


図-4 換算荷重と合成荷重(波の谷作用時L. W. L.)

全体3次元モデルの解析結果として、合成荷重による法線平行方向港外側側壁と法線直角方向側壁の波の谷作用時(L. W. L.)の断面力分布状態を一例として図-5に示す。

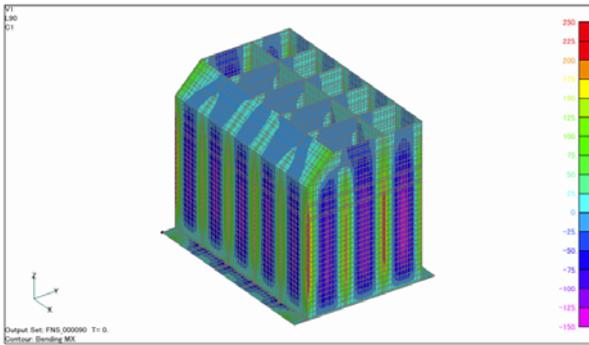


図-5 水平方向断面力分布(全体3次元モデル)

(2) 部分3次元モデルの検討

部分3次元モデルの解析結果の一例を図-6に示す。メッシュサイズは全体3次元モデルと同様である。モデル下端は固定支承、モデル化しなかった隔壁と接する隔壁は部材厚を半分として壁面直角方向(面外方向)には変位を生じないものとした。

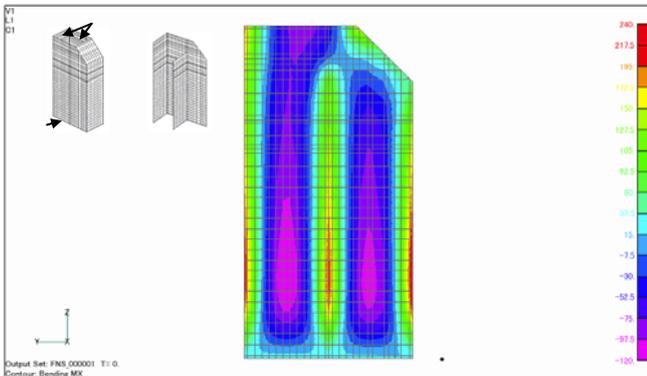
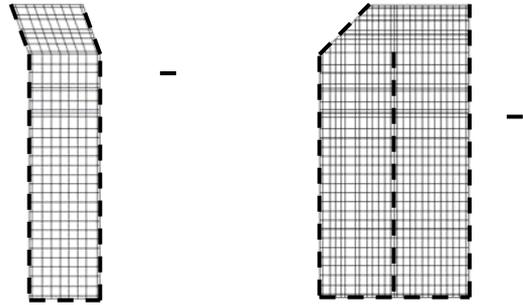


図-6 水平方向断面力分布(部分3次元モデル)

全体3次元モデルとの比較によると、部分3次元モデルを用いた解析でも同様の断面力を得ることが判明した。

(3) 版部材モデルの検討

版部材モデルとして、法線平行方向港外側側壁モデルと法線直角方向側壁モデルを図-7に示す。モデル端部は固定支承、ケーソン頭部にあたる辺は自由端とした。また、法線直角方向側壁についてはモデル中央にあたる隔壁部分も固定支承としている。



(法線平行方向港外側側壁)

(法線直角方向側壁)

図-7 版部材モデル図

全体3次元モデルとの比較によると、法線直角方向側壁は版モデルで設計することにより全体3次元モデルと同程度の結果が得られた(図-8参照)。ただし、隔壁頂部(A部)と斜面壁頂部(B部)については版モデルが大きめの断面力を示すので補正が必要であると考えられる。

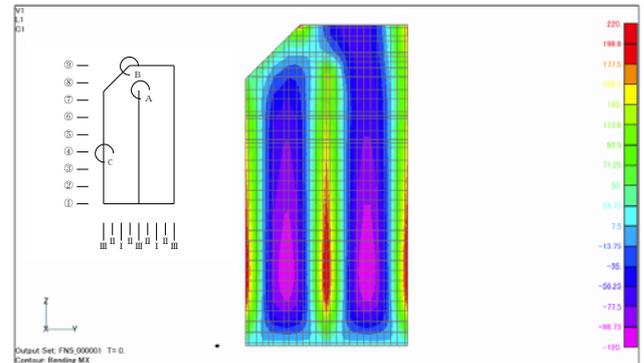


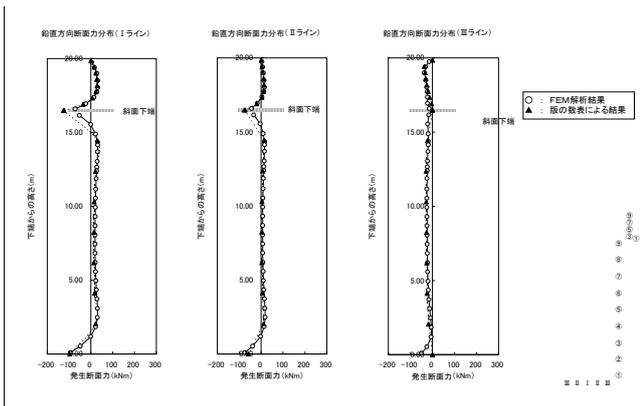
図-8 水平方向断面力分布(版部材モデル)

法線平行方向港外側側壁は、鉛直内側配筋の底版との接合部分(①ライン)では全体3次元モデルの断面力が大きめの値となっている。これは、全体3次元モデルにおいてはフーチングと底版に発生した断面力が法線平行方向側壁下端に伝達されることの影響と考えられるが、従来の設計ではフーチングおよび底版からの断面力の影響は考慮していないことから、この影響は無視することが可能であると考えられる。また、版部材モデルでは法線平行方向港外側側壁と法線直角方向側壁とのあいだにおいて設計格子点と水平方向の発生断面力を用いて不釣り合い

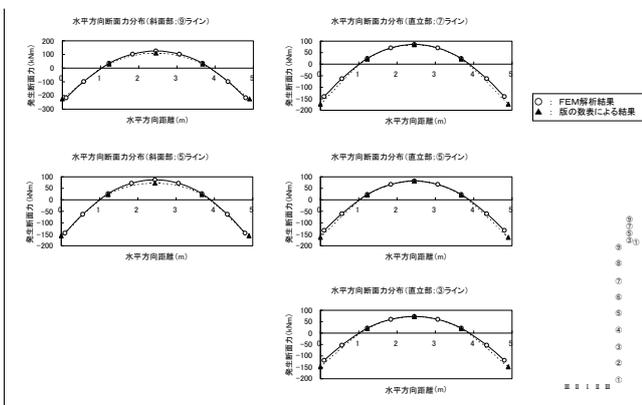
モーメントの補正を行っているが、実際は設計格子点よりも部材端部で大きな断面力が発生していることと、斜面壁は傾きがあるので鉛直方向断面力も何らかの影響を与えていると考えられることから、これらを考慮した補正方法が必要であると考えられる。

断面力算定における版の計算図表の適用性を検討するため、法線平行方向港外側側壁の斜面壁部と直立壁部における全体3次元モデルと版の計算図表による発生断面力の比較を行った。比較結果を図-9に示す。鉛直方向分布では、斜面下端部分で版の計算図表のほうが大きめの値を示している。直立壁下端では全体3次元モデルが大きめの値を示しているが、これはフーチングおよび底板からのモーメントの伝達の影響と考えられる。一方水平方向分布においては、全体3次元モデルと版の計算図表による発生断面力は、ほぼ同程度の断面力を示している。

これより、直立壁下端および斜面下端部を除いて両者の断面力に大きな違いはないことから、斜面壁は3辺固定1辺自由版として、直立壁は4辺固定版として版の計算図表を用いて設計が可能であると考えられる。ただし、今回の検討ケースは斜面角度が45°の場合の結果であり、斜面壁の形状によっては確認が必要である。



(a) 鉛直方向断面力分布



(b) 水平方向断面力分布

図-9 全体3次元モデルと版の計算図表の比較

3.4 合理的な構造解析法の検討

半没水上部斜面ケーソン堤の合理的な構造断面に関する検討から、次のような結果が得られた。

- ①半没水上部斜面ケーソン部材に作用する荷重は、個々の荷重の合力作用位置を合わせた等価台形分布とすることにより実際の合成荷重に近い断面力となる。
- ②法線直角方向側壁の断面力は、港外側2隔室分の版モデルによるFEM解析によっておおむね評価することができる。ただし、中間隔壁頂部と斜面壁頂部は若干過大評価となるため、低減補正をする必要がある。
- ③法線平行方向港外側側壁の断面力は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に記載されている版の計算図表を用いることができる。ただし、斜面壁頂部の法線直角方向側壁との不釣り合いモーメントの処理だけでは断面力が若干過小評価となるため、割増し補正する必要がある。

4. 今後の検討について

以上の検討結果から、半没水上部斜面ケーソン堤の設計法の確立と実用化へ向けての方向性を確認することができた。K港においては、実証試験堤ケーソンの製作に引き続きケーソンの進水・仮置・据付および中詰工・上部工が予定されている。

今後、実証試験堤に係わる施工データ(施工手順・歩掛かり・安全対策・施工改善策等)について取りまとめ、経済性の比較をした上でモデル地点への適用性について再評価することが大切であると考えられる。

また、一般的な設計法の確立に向けては、法線直角方向側壁の斜面壁頂部および法線平行方向隔壁港外側頂部の断面力の補正を、いくつかの断面パターンに対して補正係数、範囲等を提案することにより対処し、断面力を簡易に算定できる計算図表により、基本的な設計を行うことができれば、今後半没水上部斜面ケーソン堤の基本設計を実施する際の大きな手助けになると考える。

おわりに、本稿がモデル地点に限らず、経済的な防波堤断面の検討を実施するための手掛かりとして、半没水上部斜面ケーソン堤について設計法および施工法に関する技術マニュアル(手引き書)を整備するための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利：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.706-710，1994。
- 2) 森平倫生・国田 治：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.295-298，1979。

Iライン IIライン IIIライン
斜面下端 斜面下端 斜面下端

下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

斜面部 直立部

斜面部：⑨ライン 直立部：⑦ライン
斜面部：⑤ライン 直立部：⑤ライン
直立部：③ライン

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)

Iライン IIライン IIIライン
斜面下端 斜面下端 斜面下端

下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

斜面部 直立部

斜面部：⑨ライン 直立部：⑦ライン
斜面部：⑤ライン 直立部：⑤ライン
直立部：③ライン

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)

Iライン IIライン IIIライン
斜面下端 斜面下端 斜面下端

下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)
下端からの高さ (m)

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

斜面部 直立部

斜面部：⑨ライン 直立部：⑦ライン
斜面部：⑤ライン 直立部：⑤ライン
直立部：③ライン

発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)
発生断面力 (k Nm)

水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)
水平方向距離 (m)

水平方向距離 (m)

mm mm mm

mm mm mm 水平方向距離 (m)