

環境保全型防波堤周辺の波浪変形計算

鈴木康正*・森川高德**・辻 安治***
永末英之****・平石哲也*****

1. はじめに

防波堤の第一義的な目的は、高波の港内への侵入を遮断し港内を静穏に保つことである。そこで、従来から遮蔽効果が高く、耐波安定性に優れた直立ケーソン堤が防波堤として多用されてきた。しかしながら、荒天時には有用なこれらの防波堤は、静穏時にも海水の移動を妨げるので、港内の水質の悪化の一因ともなっている。特に近年は、港内においても“人にやさしい”親水性空間を創造する必要がある、静穏時に海水の流動を妨げず、環境保全に有効な海水交換タイプの防波堤の開発が強く望まれる。海水交換型の防波堤は、ケーソン堤の一部に港湾の内と外をつなぐ貫通部を設けたもので、外洋の波のエネルギーの一部が透過波となって港内へ侵入する。したがって、海水交換型防波堤の遮蔽効果を推定し、港湾計画を策定するために重要な波浪変形計算においても、防波堤において透過する波のエネルギーを計算できる機能を付加しなければならない。従来、捨石型防波堤の透過波を考慮した計算法は検討されている(樫木ら, 1992)が、海水交換型を対象とし、平面模型実験で計算法の適用性を検討した例はない。本研究では、高山ら(1991)が提案した碎波、反射を考慮したエネルギー平衡方程式による計算法を改良して、防波堤より透過してくる波のエネルギーを評価できる数値計算法を確立し、そして、模型実験により数値計算法の検証を行うことを目的とした。

2. 透過堤による波エネルギーの逸散

沖波が防波堤などの構造物に到達するとき、構造物両端部での回折や越波を除けば、波は反射波となって、進行方向と逆向きに進み、堤内への波の進入はない。一方、環境保全に有効な海水交換型の防波堤(以降、透過堤と呼ぶ)は、沖波が堤体に衝突した後、ある程度、波が

堤内へ進入する構造となっている。

このようなことから、透過堤が存在する場合の波浪変形計算を行なうためには、通常は無透過防波堤に対する場合とは異なり、堤体の持つ透過率に応じて堤内への波エネルギーの進入を考慮しなければならない。

ここで、高山ら(1991)の波浪変形計算手法で用いられた碎波の表現は、水深の減少に伴い、各成分波のエネルギーをある割合で逐次減衰させることを基本とした。

よって、透過堤を考慮する場合においても、波が堤体を通して港内に進入する際、各成分波のエネルギーを、透過率に応じて減少させることを計算の基本とした。

3. 数値計算法

(1) 波エネルギー低減効果の導入

高山ら(1991)の手法は、エネルギー平衡方程式を拡張した式(1)を基礎式としている。

$$\partial D_s V_x / \partial x + \partial D_s V_y / \partial y + \partial D_s V_\theta / \partial \theta = -\epsilon'_b D_s \dots (1)$$

ここに、 D_s : 成分波のエネルギー

V_x : x 方向の群速度成分

V_y : y 方向の群速度成分

V_θ : 波向方向の群速度

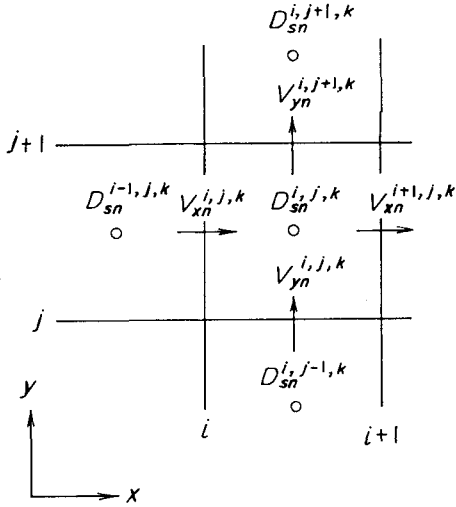
ϵ'_b : 碎波によるエネルギー逸散率

である。この式で、左辺は不規則波を構成する任意の成分波が、ある区間を進行した時のエネルギーフラックスの変化量で、第1, 2項が浅水変形によるもの、第3項が屈折によるものである。ここで、図-1に示す計算格子について考える。 i, j はそれぞれ x 及び y 軸方向の格子番号、 n は N 個に分割した周波数の n 番目の周波数成分、 k は K 個に分割した k 番目の波向である。

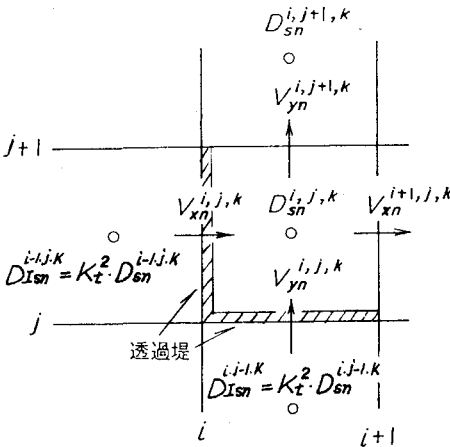
まず、図-1(a)についてエネルギーの流入を考えると、高山ら(1991)は碎波によるエネルギーの逸散を考慮しており、これが、式(1)の $-\epsilon'_b$ の形で表されている。

このような高山らの手法をさらに拡張して、図-1(b)のような透過堤配置をした計算格子を考えるとき、透過堤を通過する直前の格子($i-1, j$)及び($i, j-1$)から、次の格子(i, j)に流入する波エネルギーを透過率 K_t に応じて減少させる。具体的には、格子($i-1, j$)及び($i, j-1$)から透過堤を通過して格子(i, j)に流入するエネルギーを

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長
** 正会員 玉野総合コンサルタント(株)海洋部
*** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局高知港工事事務所長
**** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所建設専門官
***** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官



(a) 透過堤がない場合



(b) 透過堤がある場合

図-1 計算格子内における成分波のエネルギーの流出入

各々, $DI_{sn}^{i-1,j,k}, DI_{sn}^{i,j-1,k}$ とすると,

$$DI_{sn}^{i-1,j,k} = K_t^2 D_{sn}^{i-1,j,k}$$

$$DI_{sn}^{i,j-1,k} = K_t^2 D_{sn}^{i,j-1,k}$$

とみなして, 数値計算を行う。

(2) 境界条件による透過堤の認識

透過堤の存在及び各種配置パターンは境界条件によって認識させる。また, 本計算では, 港内からの反射波の透過堤再通過を考慮している。この場合, 格子条件が異なってくるが, これは, プログラム内で自動的に処理できるようにになっている。なお, 透過堤の処理に関する部分以外はすべて高山ら (1991) の方法にしたがい, 本計算法全体の詳細は文献 (鈴木ら, 1994) に示している。

4. 計算結果の検討

本計算法の妥当性を検討するため, 透過堤を用いた港内静穏度実験を実施し, その結果と本計算結果との比較を行った。

(1) 実験の概要

a) 実験装置

実験は第四港湾建設局下関調査設計事務所所有の潮流・波浪実験場内潮流・波浪実験水槽において, 図-2に示す内湾性の強い山口県三田尻中関港をモデルに, 水平・鉛直縮尺とも 1/150 で実施した。なお, 実験は単一方向不規則波造波装置を用いて行った。

図-3は透過堤模型の構造であり, 透水のために下部に開口部を有している。この防波堤は, 水路による大縮尺断面実験の結果, H. W. L+3.33 m, 有義波高 3.9 m, 有義波周期 9.2 s の条件で, 反射率 67%, 透過率 42% の特性を有することが判明した。実験では, この透過堤模型を, 図-2のように港口部に2箇所設置し, それぞれ, 東防波堤及び西防波堤とした。

b) 実験及び解析方法

実験で目標とした不規則波の諸元及び潮位条件は断面実験に合わせ, 有義波高 3.9 m, 有義波周期 9.2 s, H. W. L+3.33 m とした。実験ケースとしては, 2本の防波堤のうち, 東防波堤の延長は 470 m で一定とし, 西防波堤の延長を 300 m, 600 m の2ケースに変化させた。

主要な波高計設置位置は図-2に示す防波堤背後の a 付近に5点, b 付近に5点, 人工島周辺の c 付近に6点, d 付近に8点, e 付近に5点, f 付近に4点, 港奥部の g 付近に4点, h 付近に6点, i 付近に5点, j 付近に7点, k 付近に6点, 計 61 点とした。

測定結果の表示方法としては, 上述の a~k までを各区域とみなし, 各区域に属する測定点での波高を平均し, その値をその区域の代表波高とした。

(2) 計算条件

計算に際しては, 実験に準じ, 入射波の諸元を波高 3.9

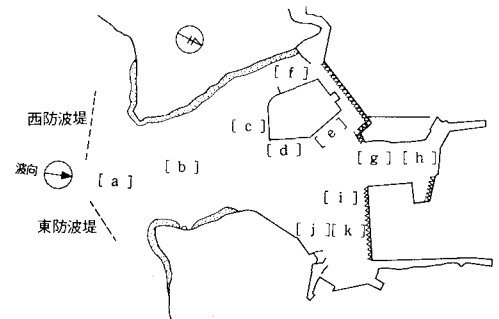


図-2 三田尻中関港の波高計設置領域と計算領域

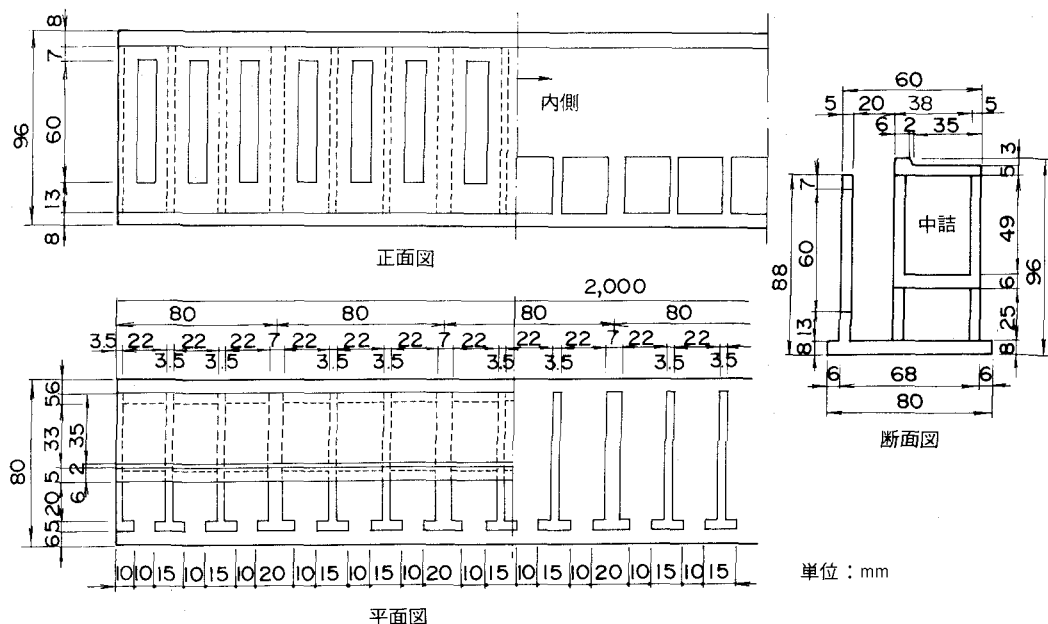


図-3 透過堤の構造

m, 周期 9.2 s, 方向集中度パラメータは $S_{max}=1000$ として単一方向波による計算を行った。計算メッシュは、防波堤外を 150 m, 港内を 75 m とした。また、計算ケースとして、西防波堤の延長を 300 m と 600 m の 2 種類に変え、透過率 K_t も 70, 60, 50, 40 及び 0% (無透過) の 5 種類に変化させて、総計 10 ケースについて計算を行った。

結果については、図-2 に示した a~k 区域毎に、波高計設置点に相当する位置の計算格子点を選定し、そこに属する計算格子点での有義波高値を平均したものを当該区域の代表計算波高値とした。なお、有義波高は、入・反射合成波高として算出した。

(3) 計算値と実験値との比較

a) 西防波堤の延長が 300 m の場合

図-4(a) で透過率 40~70% の波高計算値と実験値を比較すると、港口付近の区域 a, b では透過率 40% の計算結果が実験値と 2~6% の差でよく一致している。区域 c, d, e, f では、計算値が実験値よりもやや低い傾向にあるが、区域 e を除き両者の差は小さく、透過率 50% の計算値と比較して、12~17% 程度である。港奥部の区域 g, h をみると、区域 g では透過率 40% 値が実験値と一致し、区域 h も、透過率 50% 値が実験値と 10% 程度の差でほぼ一致している。

一方、区域 i, j, k では、いずれの計算値も、実験値を上回る結果となっており、その差は、透過率 40% の計算値と実験値では、32~62% 程度ある。

b) 西防波堤の延長が 600 m の場合

図-4(b) について、全体傾向をみると、防波堤の延長が長くなったことから、波高は計算値、実験値とも西防波堤 300 m 時に比較して減少している。次いで、区域別にみると、港口付近の区域 a, b では、透過率 40% 値が実験値と 2% 以内の差でよく一致している。区域 c, d, e, f では、前項と同様、計算値が実験値より低い傾向にあるが、区域 f を除いてその差は小さく、透過率 50% 値と比較して、9~22% 程度である。港奥部の区域 g, h では、透過率 40% 値が実験値と一致している。

一方、区域 i, j, k では、前項と同様、いずれの計算値も、実験値を上回る結果となっており、その差は透過率 40% 値と比較して、18~43% 程度ある。

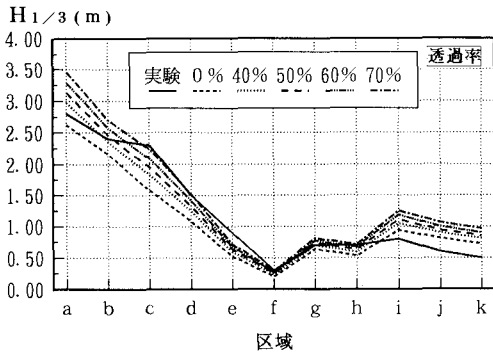
c) 計算値と実験値の整合性

前項までの結果について、各区域の位置的特性等を考慮しつつ検討を加える。

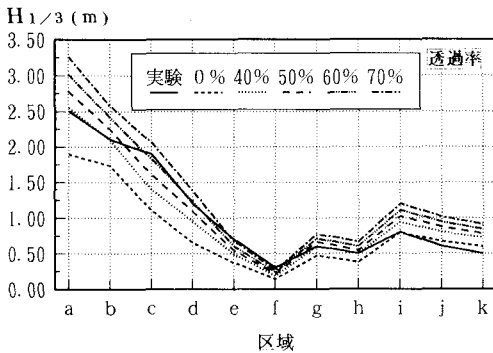
はじめに、本地形における波浪変形の傾向についてみると、港口部付近では、実験時の観察でもみられているように、防波堤による回折の影響は小さい。これは、本防波堤が透過型であること、及び、入射波長が防波堤や開口部に対し短いことなどによる。

また、港内に向けては、水深が浅く変化していることから、港内の波浪変形は浅水変形や屈折、反射が支配的になるものと思われる。

次いで、区域別に検討すると、港口部の区域 a, b は、透過堤の背後に位置するとともに、港内構造物からの多



(a) 西防波堤 300m



(b) 西防波堤 600m

図-4 透過率に関する計算値と実験値の比較

重反射の影響が少ないことから、防波堤の透過効果を直接的に受ける区域である。当該区域の比較結果では、西防波堤 300 m 時、600 m 時のいずれのケースにおいても、透過率 40% の計算値が実験値と 6% 以内の差でよく一致していた。区域 c, d, e では、両ケースとも、透過率 40~50% の計算値が実験値よりやや低い傾向にあった。このうち、区域 c, d は人工島前面に位置し、実験時に護岸の反射を直接受けやすく、特に、区域 d では対岸からの一、二次反射もある。また、区域 e は、人工島背後に位置し、実験時に人工島以奥からの反射波が多重になりやすい。ここで、本計算法は反射波を考慮しているが、反射境界は格子形状 (直角形状) で表現せざるを得ず、実験時の反射を正確に再現することは困難であり、上述のように多重反射が生じてくると、誤差も一層蓄積される。ここに、実験値と計算値の差が生じたものと思われる。ただし、前述のとおり、区域 e を除き、実験値と透過率 50% 値の差は 15% 以下と少ない。人工島背後に位置する区域 f も、計算値が実験値を下回る結果となったが、本区域も反射の影響が強く、これが誤差となって表れたものと推察する。ただ、波高自体が 0.3 m 以下と小さく、両者の差は問題にならないものと思われる。港奥部に位置す

る区域 g 及び h をみると、区域 g では両ケースとも透過率 40% 値が実験値と一致している。一方、区域 h では、西防波堤 300 m のケースで、透過率 40~50% 値が実験値より低い値となったが、これは、当該区域が港の最奥に位置し、実験時に 3 壁面からの複雑な反射が生じたことによる誤差であるものと推察される。ただ、この場合も、透過率 50% 値と実験値との差は 10% と小さい。一方、区域 i, j, k では、いずれのケースも、計算値が高い値を示し、透過率 0% (不透過) の条件でも、ほとんどの区域で、計算値が実験値を上回る結果となっている。ここで、実験時での各区域に属する測定点の波高を確認したところ、いずれの区域も護岸前面付近の測定点で波高が急減しており、これが実験での平均波高を下げる原因となっている。波高が急減した要因として、当該区域には図-2 のように、河川や各種凹凸が存在することが挙げられる。本計算ではこれらの地形条件を考慮しておらず、また、これらの地形条件に対し、計算時に設定した護岸反射率が妥当でなかったことが、本計算値と実験値の差となって表れた可能性がある。なお、護岸前面付近の測点を除けば、実験値と透過率 40% 値との差は最大でも 35% 程度となってくる。

以上のように、断面実験において判明している 42% の透過率を有す透過堤を用いた実験値と計算値を比較すると、西防波堤の延長 300 m, 600 m のケースとも、透過堤の影響を直接受ける港口部の区域で、透過率 40% の計算値が実験値とよく一致した。その他の区域でも、多重反射の影響を強く受ける区域や地形が複雑に変化する区域を除き、透過率 40~50% 値と実験値は 15% 以内の差でほぼ一致した。したがって、本計算手法は、透過堤が存在する海域での波浪変形計算に適用可能であるものと判断できる。

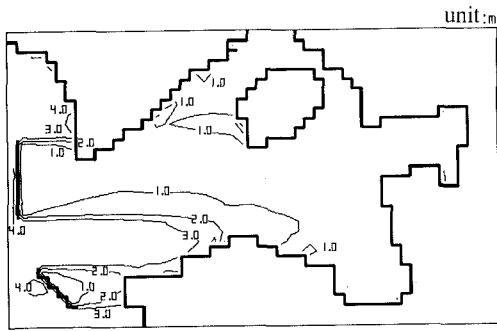
(4) 透過効果について

図-5(a)~(c) は、本計算手法より求めた透過率 70%、40% 及び無透過の 3 ケースにおける港内波高分布である。計算条件は、東防波堤 470 m, 西防波堤 600 m, 波の諸元は前項と同じく、有義波高 3.9 m, 有義波周期 9.2 s, $S_{max}=1000$ で、その他の条件 (計算格子等) も前項と同じである。

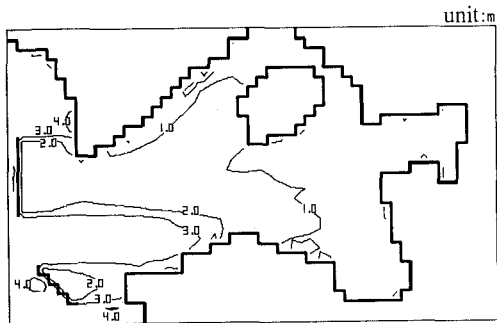
はじめに、無透過のケースでは、東・西防波堤背後の波高は 1 m 以下となっており、港内中央部から奥部にかけても大部分が 1 m 以下の分布となっている。

透過率 40% のケースでは、西防波堤背後の波高は 1 m 以上となり、その分布は港内中央部に及んでいる。東防波堤背後の波高も西防波堤同様 1 m 以上となっている。

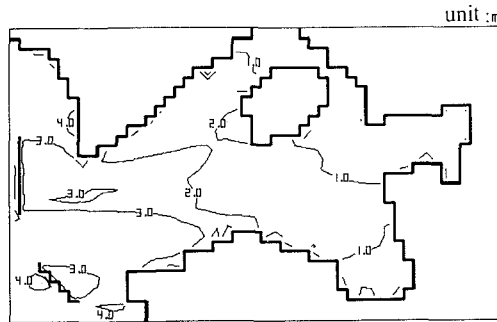
透過率 70% のケースになると、西防波堤背後の波高は 2 m 以上となり、その分布は港内中央部手前付近まで広がっている。さらに、波高 1 m 以上の範囲も、港内中央



(a) 無透過の場合



(b) 透過率40%の場合



(c) 透過率70%の場合

図一5 透過率の違いによる波高分布の比較

部から一部港奥部にまで達している。また、東防波堤背後の波高も西防波堤同様2m以上となっている。

以上のように、海水交換型防波堤の透過率が港内波高

に及ぼす影響は大きく、当該防波堤の計画、設計に際しては、港内の利用状況を十分考慮した上で目標透過率を設定する必要があることが分かる。

5. まとめ

本研究では、高山ら(1991)が開発した砕波、反射を考慮した波浪変形計算手法を改良して、港内の水質環境保全の観点から近年要請が高まっている海水交換タイプの防波堤が存在する港湾に適用できる波浪変形計算法の確立を試みた。そして、計算手法の妥当性を検討するため、透過率42%(断面実験時)の特性を有す透過堤を用いた平面水理模型実験との比較を行った。計算に際しては、実験と同様、港口部に配置する東、西2本の透過堤のうち東は延長470mで一定とし、西の延長を300mと600mの2ケースに変化させた。さらに、透過条件として、両防波堤とも透過率70、60、50、40及び0%(無透過)の5ケースを設け、計10ケースの計算を実施した。

その結果、西防波堤の延長に関わらず、透過堤の影響を直接受ける港口部の区域で、透過率40%で実施した計算値が実験値と6%以内でよく一致した。その他の区域についても、多重反射の影響が強い区域や地形が複雑に変化する区域を除き、透過率40~50%値と実験値は15%以内の差でほぼ一致した。以上のことから、今回の計算手法は、透過堤が存在する海域での波浪変形計算に適用可能であるものと判断する。

なお、本研究を遂行するに当たり、計算法について適切なアドバイスを頂き、研究全般にわたって懇切にご指導頂いた港湾技術研究所水工部長高山知司博士に深く感謝する次第である。

参考文献

- 榎木 亨・井田康夫・後野正雄・菅 智浩(1992): 透過性構造物による波変形の模型実験の限界について, 第39回海講論文集, pp. 616-620.
- 鈴木康正・森川高徳・平石哲也・望月徳雄(1994): 浅海域における波浪変形計算法の拡張, 港研資料 No. 767, 35 p.
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港研報告, 第30巻, 第1号, pp. 21-67.