

斜め入射波に対する反射波解析について

宮城 一彰¹・齊藤 泰

¹関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 技術開発課
(〒221-0053 神奈川県横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

横須賀港新港地区では新規ふ頭の整備が計画されており、港湾計画で設定されている港内静穏度を確保するため、新規ふ頭の整備にあたっては低反射性能を有した岸壁の整備が求められている。本検討の対象岸壁は新規ふ頭北西側に位置しており、北東方向から岸壁法線に沿うような波（斜め入射波）が入射するが、斜め入射波に対して低反射性能を評価した知見は多くない。

本稿では、解析手法として3次元数値波動水槽による反射波解析を実施し、斜め入射波に対する低反射性能を検討した事例を報告する。

キーワード 岸壁，設計，低反射性能，斜め入射波，反射波解析

1. はじめに

横須賀港新港地区では、今後も安定的に完成自動車や水産品といった外貨貨物の取扱いが見込まれる中、岸壁利用の輻輳や水深の不足、用地の逼迫などにより非効率な運用を強いられている状況にある。これらの課題に対応するため、新たな埋立による新規ふ頭の整備が計画されている（図-1）。

当該地区の港湾計画では、港内静穏度の目標は、表-1のとおりを設定されている。それぞれの波浪条件に対する静穏度解析を行った結果、護岸、岸壁の反射率（反射

波高/入射波高）を0.4とすることで港内静穏度の目標を達成することが分かった。

2. 入射波向きと反射率の評価方法

(1) 入射波の条件

本検討の対象施設である新規ふ頭北西側の岸壁は、300m対岸に既存岸壁があり、東北東方向には猿島が位置している。当該地区の主要な波向きは北東方向であり、対象岸壁の法線に沿うような波（以降、斜め入射波とする）が入射している。入射する波浪は通常時と異常時に分かち、異常時波浪に関しては通常時波浪に比べて周期が長いいため、水深による屈折変形を受けて岸壁法線直角方向に対して比較的直入射に近い方向（30度程度）から作用することが確認されている（図-2）。

一方、通常時の波浪に関しては周期が短いいため、水深変化による屈折変形が生じない。そのため、港口部から



図-1 横須賀港新港地区新規ふ頭の計画位置

表-1 港内静穏度の目標

波浪条件	荷役限界波高	稼働率
通常時	0.5m	97.5%
異常時	1.5m	-



図-2 対象岸壁への入射方向

入射する角度が変化せず、岸壁法線に沿った形で入射する。角度としては図-2に示すように岸壁法線直角方向から70度程度の角度となる。

平山ら (2011) ¹⁾によると、消波護岸に対する単一波群の入射角(波向き角)による反射率の変化は、消波護岸に対して直入射を0度とした場合、入射角が大きいほど反射率が增大する傾向にあるとされている。

当該地の条件下では、異常時に比べ通常時波浪の方が入射角が大きく、反射率が大きくなることが想定される。そのため、斜め入射波の影響検討は通常時波浪を対象に検討を行うものとする。

入射波高に関しては岸壁法線上の平均的な波高として0.3mを設定し、入射角については70度を設定する。

(2) 斜め入射波に対する低反射性能の評価

対象施設では構造形式は重力式と栈橋式を抽出して検討している。反射率の低減が期待できる構造として、重力式の場合は、ケーソン前面に透過壁と遊水室を設けた構造であるスリットケーソン(図-3の赤丸で示した箇所)、栈橋式の場合は、土留め護岸で有効とされる直立消波ブロック(図-4の赤丸で示した箇所)がある。

しかし、スリットケーソンの反射率に関する理論・実験は波が直角に入射する文献²⁾が多く見られ、直立消波ブロックにおいても、斜め入射波に対する反射率の見解は多くない。そこで、低反射構造であるスリットケーソン、直立消波ブロックに対し、上述のとおり岸壁法線直角方向に対して70度の波向きで反射波解析を行い、反射率の確認を行った。



図-3 重力式(スリットケーソン)の断面図

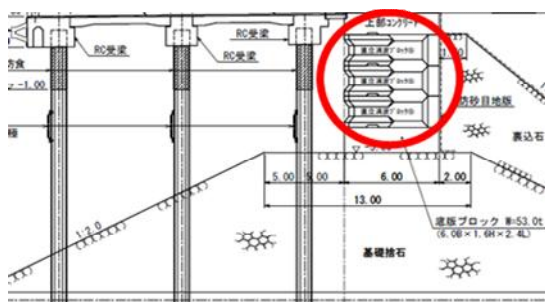


図-4 栈橋式(土留部:直立消波ブロック)の断面図

$$\eta_i = \frac{\eta \sin(2\alpha - \theta) + \sqrt{h/gv}}{\sin(2\alpha - \theta) - \sin\theta} = \frac{\eta \cos(2\alpha - \theta) + \sqrt{h/gu}}{\cos(2\alpha - \theta) + \cos\theta} \quad (1a)$$

$$\eta_r = \frac{\eta \sin\theta + \sqrt{h/gv}}{\sin(2\alpha - \theta) - \sin\theta} = \frac{\eta \cos\theta - \sqrt{h/gu}}{\cos(2\alpha - \theta) + \cos\theta} \quad (1b)$$

- η : 水位(入射波と反射波の合成)
- u : x方向成分の流速
- v : y方向成分の流速
- α : 反射面法線直角方向に対する入射角
- θ : 水平2成分流速におけるx座標の正の向きと入射波向が成す角
- η_i : 入射波の水位
- η_r : 反射波の水位

本検討では反射率の評価方法として、Guza (1984) ³⁾の方法を平面波浪場へ拡張した平山ら (2011) ¹⁾の方法を適用するものとした。

平山ら (2011) ¹⁾の方法は、同一地点の水位・流速の同時波形記録を式(1a)と式(1b)に当てはめることにより入射波と反射波に分離する方法である。

3. 数値解析モデルの概要と課題への対応

様々な地形・構造物の配置に対する波・流れを数値シミュレーションするプログラムとして、2次元的な現象を再現できる数値波動水路(CADMAS-SURF)や、3次元的な現象を再現できるようCADMAS-SURFを改良した数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)が開発されている。

本検討では、斜め入射に対する反射率を評価するために3次元の水理現象を評価する必要があるため、計算手法のひとつとしてはCADMAS-SURF/3Dが該当するものの、直交格子の計算モデルとなっているため、複雑な断面形状となるスリットケーソンや直立消波ブロックを広範囲でモデル化することは難しい。

上記課題への対応として、本検討では非構造格子でモデル化が可能なOpenFOAM(Open source Field Operation And Manipulationの略)を適用するものとした。

4. 斜め入射波に対する数値解析の条件と結果

本検討では、重力式係船岸の構造形式の一種であるケーソンと、低反射構造であるスリットケーソン、直立消波ブロックを対象に数値解析を行った。

(1) 計算条件

本検討で設定した潮位、造波方法、波浪諸元を表-2に示す。潮位は平均水面(M.S.L.)とし、波高(H)は岸壁法線上の平均的な波高、周期(T)は通常時波浪の周期を設定した。造波方法は規則波と不規則波が挙げられるが、本検討では規則波を対象とした。

表-2 計算条件

潮位	M.S.L.+1.10m
造波方法	規則波
波浪諸元	H=0.3m、T=4.0S

(2) 解析領域

水位と流速の計測位置については、図-5に示すように想定される入射波共存域に複数点設置する。なお、計測位置が反射面に近い場合は構造物からの乱れの影響を受けることから、反射波方向に1.0波長程度離れた位置に配置するものとした。

岸壁全体の反射率の評価は、各地点から算出される反射率を算術平均して評価する。

(3) 計算モデル

ケーソンの計算モデルを(図-6)、スリットケーソンの計算モデルを(図-7)、直立消波ブロックの計算モデルを(図-8)に示す。

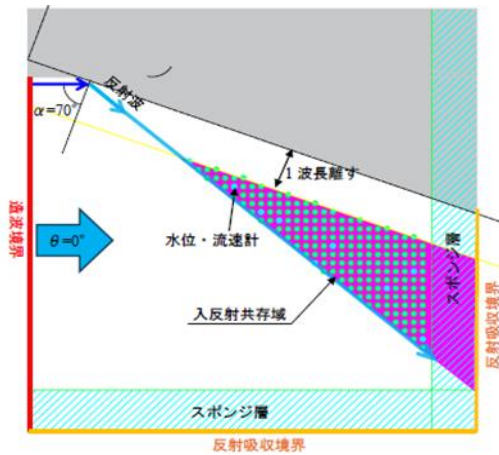


図-5 解析領域

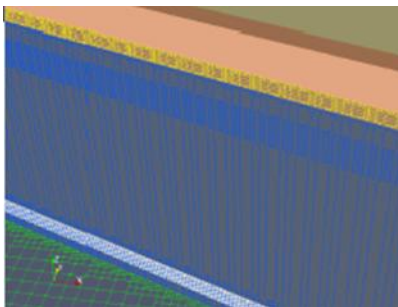


図-6 ケーソンの計算モデル

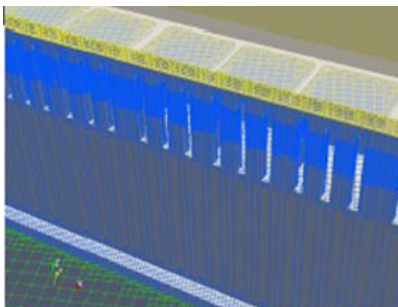


図-7 スリットケーソンの計算モデル

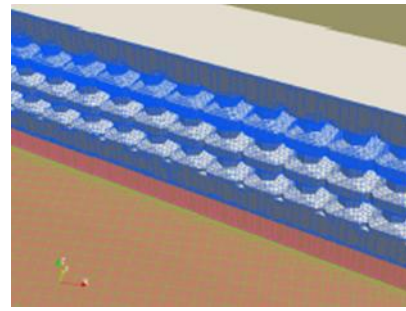


図-8 直立消波ブロックの計算モデル

(4) 解析結果

解析結果のスナップショット(斜め入射波が作用した状態)を、図-9(ケーソン)、図-10(スリットケーソン)、図-11(直立消波ブロック)に示す。

ケーソンに関しては壁面からの反射により壁面前面の波高が高くなっている状況が確認された。スリットケーソンではケーソンに比べて波高が低減しており、直立消波ブロックに関しては、壁面前面の波高が他構造に比べてさらに低い。

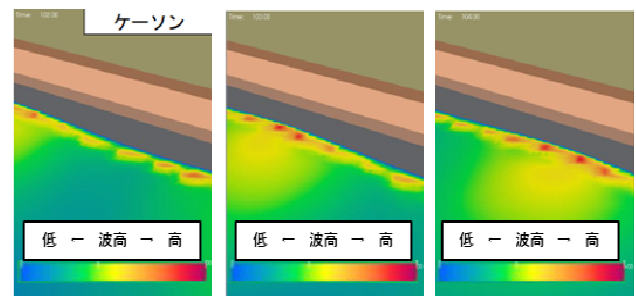


図-9 ケーソンに斜め入射波が作用した状態

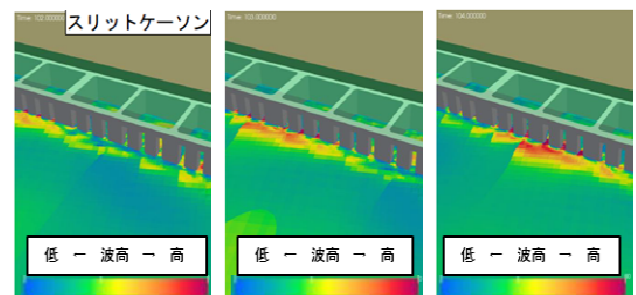


図-10 スリットケーソンに斜め入射波が作用した状態

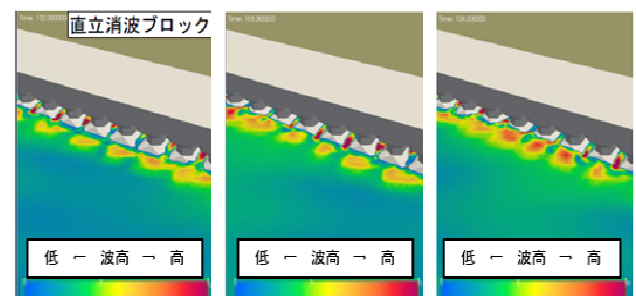


図-11 直立消波ブロックに斜め入射波が作用した状態

また、拡張したGuzaの式を用いて算出した反射率の平面分布を、**図-12**（ケーソン）、**図-13**（スリットケーソン）、**図-14**（直立消波ブロック）に示す。

反射率の平面分布については5mピッチで抽出した結果としている。また、外周スポンジ内で反射率が高くなっているが、これはスポンジ層によって入射波成分も減衰しているため、相対的に反射率が大きく見えている。

反射率の分布に関しては、壁面から1波長程度離れた箇所において、比較的大きな反射率が分布することが

確認できる。なお、構造形式に応じて、この大きな反射率の出現する位置が異なることが確認された。

ケーソンと直立消波ブロックに関しては壁面前面から1波長以内で大きな反射率が出現しているのに対し、スリットケーソンは1波長を若干超えた位置で大きな反射率が出現している。一般的に、壁面前面から1波長程度の範囲内は乱れが大きく、反射波の影響を適切に評価できない場合がある。よって、以下には1波長以上沖合での反射率の傾向に着目した考察を述べる。

いずれの構造形式も、壁面前面から離れるにしたがって反射率の程度は小さくなる傾向を示しており、特に岸壁壁面前から2波長あたり離れた箇所（**図-12**、**図-13**、**図-14**の赤丸で示した箇所）に着目すると、ケーソンは1波長あたり離れた箇所と変わらず反射率が高い状態であるのに対し、スリットケーソンや消波ブロックは反射率が低くなっていることが確認できる。

5. まとめ

本解析により、低反射性能を有するスリットケーソンと直立消波ブロックが斜め入射波に対しても反射率を低減させる効果を発揮することを確認した。具体的な反射率の数値については、引き続き検討中である。

なお、本検討は規則波を対象に反射率の評価を実施しているため、入射波と壁面からの反射波が重畳し、約1波長ごとに帯状の反射率の大小関係が交互に出現している。この要因は、規則波を対象に解析を実施しているため、入射波と反射波が重畳しやすい位置が出現したものと推察される。また、実際の海の波は不規則である。そのため、不規則波を対象とした解析や水理模型実験も行う必要があると考える。

斜め入射波に対して低反射性能を評価した知見は多くないため、今後も解析結果を蓄積し続け、構造物に作用する流体力や流れ、越波・越流などの流体運動をより高精度に解明することで、効果的・効率的な構造物の設計を実施していきたい。

参考文献

- 1) 平山克也・川内清光・宮里一郎：消波工に斜めに入射する波の反射率に関する一考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.67, No.2, 2011, pp.I_686-I_690.
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究：港湾技術研究所報告，Vol.21, No.3, 1982.
- 3) Guza R.T., E.B. Thornton and R.A. Holman：Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Houston, 1984, pp.708-723.

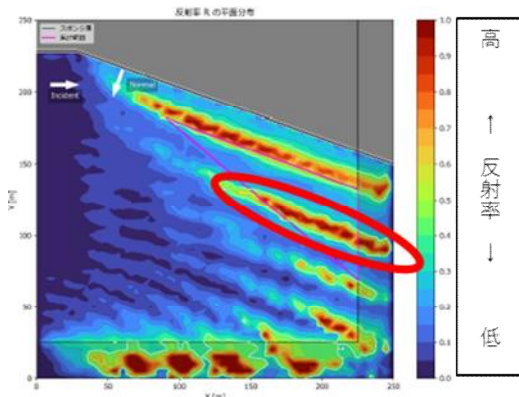


図-12 反射率の平面分布（ケーソン）

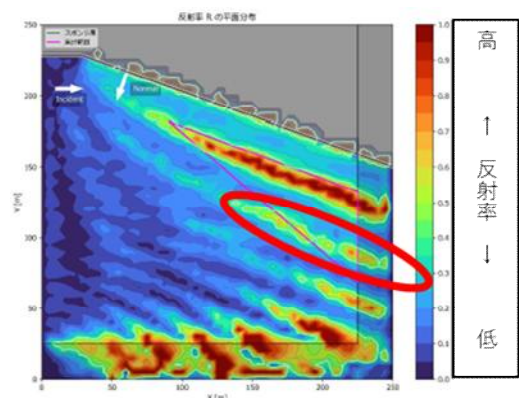


図-13 反射率の平面分布（スリットケーソン）

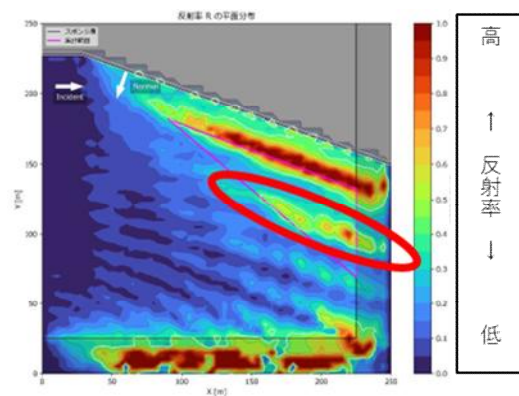


図-14 反射率の平面分布（直立消波ブロック）