

流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討

平 石 哲 也*・永 瀬 恭 一**

長周期波による港湾の係留索の切断事故や荷役障害を抑止するためには、防波堤等による入射長周期波の遮蔽だけでなく、港内における長周期波の反射率を低減し、増幅による波高増大を抑えることが必要である。一般に、港湾では風波の反射率を低減するためにスリットケーソンによる直立消波岸壁が多用されている。ここでは、陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのカンソンを活用し、カンソン背後にも幅の広い消波層を設けた長周期波対応消波岸壁を提案している。その適用性を流体直接解析法を応用して検討した結果、両面スリットカンソンを用いた長周期波対応護岸の反射率は、0.4~0.6 になることが示されている。

1. はじめに

外洋から港湾に侵入する周期数十秒~数分程度の長周期波によって、ナイロン製ロープで岸壁に係留された数千~数万 DWT クラスの大型船のサージ運動が共振によって励起され、係留索の切断や荷役障害を引き起こす現象が各地で報告されており、その対策が緊急に必要である(田端ら, 1995)。ソフト的な対策として港内長周期波の短期予測、ハード対策として沖合防波堤の最適方向への延伸が提案されている(平石ら, 1997)。

ハード対策の効果を数値的に表す指標として平石ら(2001a)は、長周期波に対する荷役稼働率を計算し、目標値が確保できるまで防波堤を延伸したり、波除堤を建設する計画フローを提案している。この計算では、港内の岸壁や護岸を反射率 1.0 の完全反射壁として考慮し、遊水部が数 m の消波スリットカンソン岸壁でも長周期波の消波は考えていない。一般に周期が長い長周期波は、港内での消波や吸収が困難で、水路の固有周期が入射波の周期と一致する場合には、港湾内の共振現象により波高が増大する危険性がある。

一方、長周期波の反射については、自然の海浜で観測した例(岡安ら, 1998)があり、その反射率を 0.7 以下と推定している。したがって、港内に自然海浜等が多く残っておれば、入射した長周期波のエネルギーの一部が吸収され、岸壁前面の波高を低下させることが可能である。現実の被害例では、那覇港や宮崎港のように港内にリーフや干潟が点在し、自然海岸が一部残されている港湾では、近隣の港湾で長周期波による荷役障害が報告されていても該当港湾では障害が報告されていない(平石ら, 1996)。港内における長周期波の増幅を抑止するためには、岸壁等の反射率を低減させることが必須であり、港湾区域における自然海浜の保存や人工干潟の整備が必要であるが、港湾の物流拠点としての機能を維持するためには、海浜の整備延長には限界があり、岸壁そのものの

改良で長周期波の反射波を軽減しなければならない。また、船舶が大型化して泊地の水深が 13 m 以上必要とされる今日では、浅瀬を造成して干潟や海浜を建設することは、港湾全体の配置計画を当初から検討して、特別に親水ゾーンを計画しておかないと不可能である。

港湾で多用されているスリットカンソンタイプの直立消波岸壁では遊水部の奥行きが数 m 程度であり、周期数秒の風波しか消波できない。そこで、本研究では、陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのカンソンを活用し、裏込め材に大型の雑石層を採用して、カンソン背後にも幅の広い消波層を設けた長周期波対応消波岸壁を提案した。そして、海水と空気層の混層における水粒子の運動を時間領域で求める流体直接解析法を応用して、消波岸壁における長周期波の反射率およびスリットの遊水室内における圧力変動を検討し、提案岸壁の長周期波に対する消波効果を把握した。

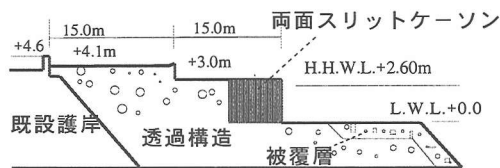
2. 両面スリットカンソンの可能性

岸壁の反射率を低下させ、港内の静穏度を上昇させるとともに、船舶の接岸点での波高軽減のために、大型港湾ではカンソンの前面にスリットを有する遊水部を設けスリット内での入射波と反射波の干渉で消波機能を発揮させるスリットカンソン岸壁が一般的に用いられる。スリットカンソンの反射率は、遊水部の相対幅とスリットの開口部の面積比(開口率)で規定され(谷本ら, 1982)、周期数秒の港内波に対して反射率が 0.5 程度になるように設計される。港湾の設計基準(日本港湾協会, 1999)ではスリットカンソンからなる直立消波護岸や岸壁の反射率は、0.3~0.6 として提案されている。ただし、スリットの遊水幅は有義波周期で計算できる波長の 1/4 程度であり、不規則波の長周期波側のエネルギーに対しては十分な消波性能は有しておらず、その反射率は波の周期によって変化する(平山, 2001)。周期が 30 s 以上の長周期波に対してはほとんど消波効果を有しない。

横須賀馬堀海岸の高潮対策護岸整備事業では、風波に対する消波効果の向上と護岸背後の遊歩道部に越波した

* 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

** 正会員 工博 (株)フジタ 技術センター



図一1 馬堀海岸の標準的な護岸断面の模式(関東地方整備局 京浜港湾工事事務所資料参照)



写真一1 馬堀海岸の現状(平成14年4月)

波の地下への排水を促進するために、海側と陸側の両面にスリットを有するケーソン護岸が使用された。図一1は、馬堀海岸高潮対策護岸の標準部の模式断面を示す。小段部に続くケーソンの図の断面方向の長さや鉛直高さは、ともに5.0mである。海側(前面)スリットは幅20cmで一函あたり4本設けられている。スリットの開口総延長/ケーソン幅を開口率として定義すると $\delta=0.2$ になる。ケーソンの側面にも遊水室内の空気圧を軽減するために開口率0.2のスリットが設けられている。ケーソンの陸側(後面)も同様な開口率0.2のスリットを有し、ここでは両面スリットケーソンと呼ぶ。これに対し、従来型の前面のみスリットを有するケーソンを片面スリットケーソンと呼ぶ。後面スリットの背後には直径50cm以上の雑石を配置し、ケーソン内への滑落を防止し、随時、直径の小さい雑石を投入して背後の裏込め層を形成している。馬堀護岸のケーソン設置工事は平成12年1月からはじまり、平成14年4月現在で総延長の一部の本体工事が終了している。写真一1は、馬堀海岸護岸の現状で、設置後1年が経過しているが裏込め材の沈下やケーソン遊水室内部への雑石の滑落は生じていない。裏込め材への海水の侵入は水の濾過効果も生じており、前面の海底にはにがりが全く見られず、海藻等の群生が生じていた。工事区間のケーソンは小型で、大水深岸壁へ対応させるためには、ケーソン函の安定性の確保など解決すべき技術課題はあるが、裏込め層の崩落の危険性は小さく、港湾においても両面スリットケーソンの活用を図ることが可能であろう。

3. 数値計算の内容

本研究では、護岸構造を単純化するために、同一断面で水面から水底までケーソンが設置され、ケーソン下部にはマウンドは無いものとしている。図一2(4)に本研究で対象とした両面スリットケーソンのイメージを示す。ケーソンの設置水深は10mで、スリットの開口率 δ は0.5とし、遊水部の幅は10mとした。スリット開口部の高さは水面上1.0mである。ケーソン背後の消波層の幅は40mとし、スリットの空隙よりも大きい直径の雑石を配することを想定して、基本ケースでは、現地で粒径20cmの固形粒子を有する多孔体からなる透水層として解析を行った。

計算では、ケーソンからの反射波や透水層内の水の移動を考慮し、また、スリットの開口部周辺の流体運動を解析しなければならないので3次元の数値波動水槽を適用する必要がある。ここでは、Navier-Stokes式の水粒子運動を3次元格子で計算できる手法として、流体直接解析法(MARS(Multi Art Resolve Solver)法)を採用した。本手法は、これまで、棧橋式岸壁の下層における風波の挙動(永瀬ら, 2000)や、津波の植樹林での減衰効果の計算(平石ら, 2001b)に適用され、構造物を越流する際の越流係数などの物理的な現象から導かれる定数を与えなくとも、構造物回りの流体運動を精度よく推定できることが示されている。ここでは遡上津波の流体力を求めた前述のモデルを改良して長周期波の変形解析に用いた。

図に示すように、長さ1200mの数値波動水路を水平方向は長さ1.0m、鉛直方向は長さ0.2mの3次元格子で表した。図の奥行き方向の領域幅はスリットの形状が再現できるように20mとした。計算では、周期 $T=30$ および60sで波高1.0mの長周期波を、2波だけ入射境界から造波し、水路内の代表点での波形を解析することによって反射率を求めた。計算ケースは、両面スリットケーソン岸壁だけでなく、比較のために勾配1/10の自然海浜と両面スリットと開口率が同一で幅10mの遊水部を有する片面スリットケーソン岸壁および建設コストが安価であり設置が容易な直立式のスリットを有しない岸壁を対象とした。自然海浜での砂粒子の粒径は、れき浜海岸を想定して1.0cmとした。

自然海浜や透水層内では移動や変形を生じない固形粒子からなる多孔体を仮定する。多孔体中での流体の運動方程式では、単位体積の流体が固体部分より受ける力 F を考慮する。計算では、流体が受ける力を次に示すErgun式(流体力学ハンドブック, 1995)で評価した。

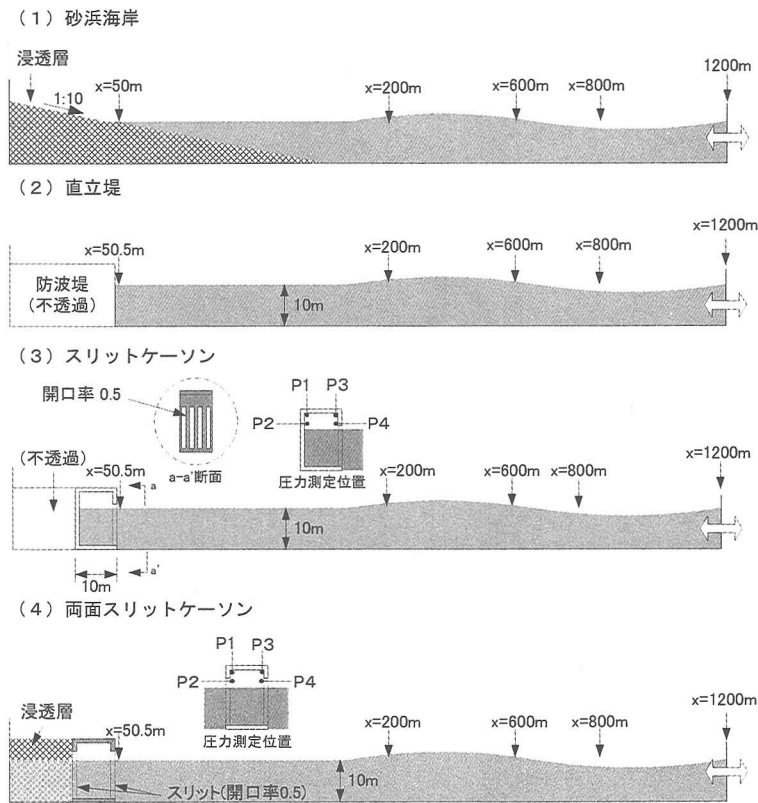


図-2 数値波動水路の模式

$$F = -\frac{150\mu}{d_p^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \epsilon u = \frac{1.75\rho}{d_p} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \epsilon u |\epsilon u| \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 d_p ：平均粒径、 u ：流速、 ϵ ：多孔体の空隙率、 μ ：流体粘度、 ρ ：流体密度である。

MARS 法では、透水層内の流速が求められるので、各タイムステップ毎に、透水層内の多孔体による抵抗力が上式から導かれ、運動方程式中の流速が減衰する。計算のタイムステップは、 $t=0.5\text{ s}$ とした。また、ケーソン本体などのすべての構造物は不透過体として、図に示すように透水層と自然海浜の陸側の計算境界は固定壁面とした。計算水路の水平方向座標の原点は、上記の陸側壁面とし、ここからの沖側への水平距離を X で表して観測点の位置を定義した。

4. 数値計算の結果

図-3 は、図-2 に示した計算地形に対して、周期 $T=30\text{ s}$ 、波高 $H=1.0\text{ m}$ の長周期波を入力させたときの護岸と自然海浜前面の代表測点における観測波形を示す。図の位置 X は前述の消波層背面から沖方向への距離を表す。 $X=200\sim 1200\text{ m}$ の両面スリット岸壁前面の測点で

は、2 波の入射波が観測された後に、反射波が観測され、反射波高は 0.32 m になる。したがって、この波形の場合には 0.3 程度の反射率が得られている。直立壁の場合には、入射長周期波波形は、沖側の観測点でほぼ同一の反射波形が観測されており、直立壁の反射率は他の構造形式に比べて高いことがわかる。これは、本計算が計算過程でのエネルギー逸算等の影響を受けず、高精度で実行されていることを表す。片面スリットおよび両面スリットケーソン岸壁の反射波形を比較すると、計算が安定する水路中央部の $X=600$ および 800 m での波形が特徴を有している。第 1 波の反射波高は、片面スリットケーソンの場合は、入射波高と同じか、やや小さくなる程度であるが、両面スリットケーソンの場合には、いずれの観測点でも波高は 0.5 m 以下になる。第 2 波は、片面スリットケーソンの場合には、入射波より大きくなるが、両面スリットケーソンでは、波高も 50% 以下でピークの分裂が見られる。砂浜海岸では、斜面上での浸透が生じており、反射波の波形は明瞭ではない。

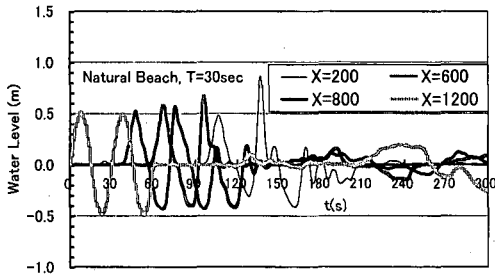
図-4 は、周期 $T=60\text{ s}$ の長周期波に対する入射波形と反射波形の計算結果を表す。長周期波の周期が長くなると第 1 波の反射波は第 2 波より大きく、反射波高が一

定しない。数値波動水路の総延長は $T=60\text{ s}$ の場合には、2 波の入射波が安定するのに不十分で、第 2 波の反射波をすべて計算するには多くの時間を有するので、沖側の $X=800\text{ m}$ では第 2 波の波形全体が計算されていない。また、今回設定した透水層の幅が 40 m で比較的小さいため、初期に流入した波が十分に減衰せずに水路端の

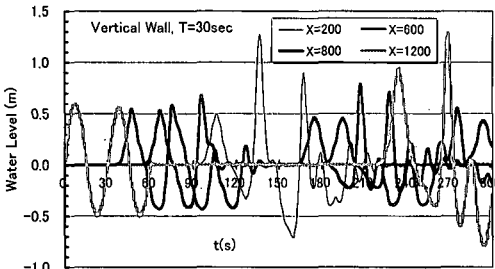
固定境界に当たって反射する影響が、第 2 波の減衰状況に影響を及ぼすために、第 1 波と第 2 波の低減率は同一にはなっていない。数値波動水路の長さを延長することが上記の問題解決になるが、現在の延長で計算機の容量の限界であり今後の計算法の改良等を行って対応する予定である。

そこで、 $T=60\text{ s}$ の場合だけでなく、平均化によって過小評価とならないように、 $T=30\text{ s}$ に関しても、 $X=600\text{ m}$ および 800 m での第 1 波のみの反射波高の平均値を入射波高で除して対象ケースでの反射率として整理した。

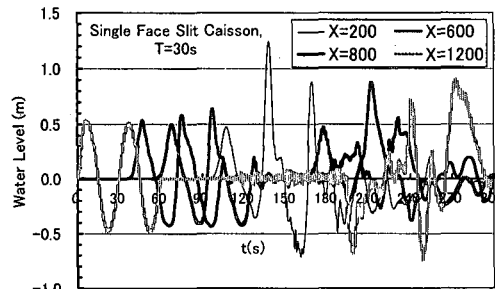
図-5 は、各計算ケースでの反射率を比較したものである。周期 $T=30\text{ s}$ の場合には、通常の直立壁では、長周期波のエネルギーは大部分が反射され、反射率が 0.71 となる。片面スリットケーソン壁では、長周期波がやや吸収されるものの、その反射率は 0.65 で高く、港内の長周期波を十分に吸収できない。自然海岸では反射率が 0.23 になり、最も消波効果が高いことが判明した。両面スリットケーソンを用いた消波岸壁は自然海岸と同様の消波性能を有し、反射率は 0.36 になる。この数値は、現地観測で求められた反射率 0.7 よりも小さい。計算では多孔体の粒径を一定として、流速が一樣と見なせる場合のエネルギー減衰を含んだ運動方程式を採用し、透水層



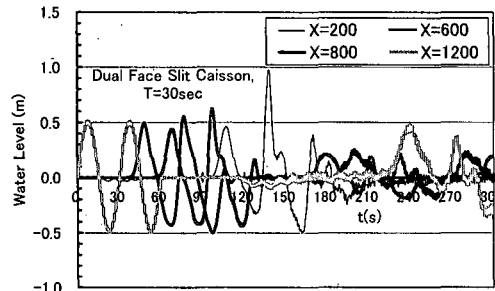
(1) 砂浜海岸



(2) 直立壁



(3) 片面スリットケーソン岸壁



(4) 両面スリットケーソン岸壁

図-3 認岸前面の計算波形 ($T=30\text{ s}$)

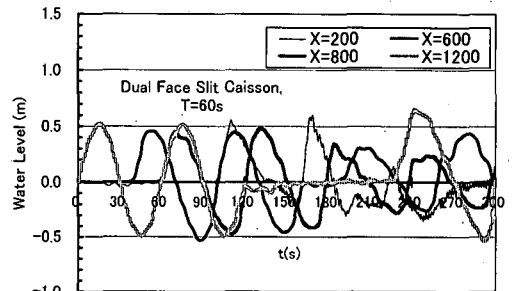


図-4 両面スリットケーソン壁前面の波形 ($T=60\text{ s}$)

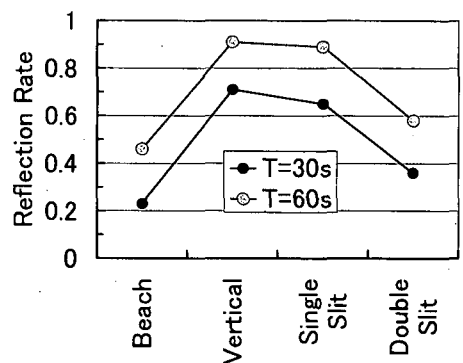
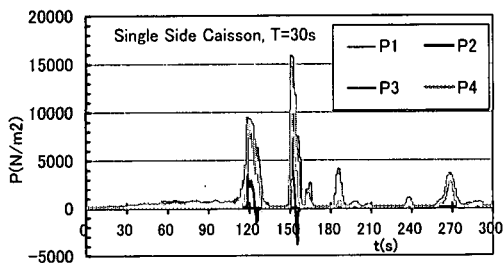
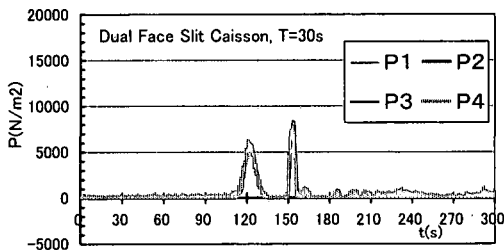


図-5 各種岸壁の反射率の比較



(1) 片面スリットケーソンの場合



(2) 両面スリットケーソンの場合

図-6 スリットケーソン遊水部の波圧計算波形

の幅も現地とは異なるため、反射率が現地観測値とは異なったものと考えられる。

しかしながら、相対的な比較から、両面スリットケーソンの優位性が確認できたので、両面スリットケーソン岸壁を長周期波吸収岸壁として整備すれば、人工海浜等の整備と同様の消波効果を期待できるものと考えられる。周期 $T=60$ s になると、反射率はやや増加し 0.58 になる。したがって長周期波の周期が長くなれば、より幅の広い透過層を必要とする。自然海浜の場合には、 $T=60$ s の場合でも反射率は 0.46 で小さく、長周期波のエネルギー軽減には最も適している。すなわち、港湾の計画立案に際しては、できるだけ港内に干潟や自然海浜を残せるようなスペースを確保し、長周期波の吸収ゾーンを設けた方がよい。ただし、港湾の利用面から砂浜の設置が困難な場合は、両面スリットケーソンを活用した岸壁“港内長周期波対応岸壁”の活用を図る方がよい。

MARS 法はケーソン遊水室内での水運動を計算しているので直接遊水室内での波圧を計算できる。ここでは、片面スリットと両面スリットケーソン岸壁の内部壁面に作用する波圧 p (N/m²) を比較した。前出の図-2 に遊水室内計算領域と計測点 P1~P4 の位置を示す。図-6 に $T=30$ s ので片面および両面スリット岸壁の測点 P1~P4 に作用する波圧の波形を示す。波の峰が侵入したときに衝撃的に圧力が発生し、最大値が表れる。衝撃流圧力のピーク値は場所によって異なり、P2 で最大となる。こ

の部分は、ケーソンの床板の強度を決めるためにも必要で、MARS 法によって設計に必要な内部の波圧解析も可能である。なお、P1 と P3 の波形は同一で図では重なっている。

図-6 に示される P2 の波形からピーク波圧 $p_{\max}$ を読みとると、片面スリットケーソンでは、 $p_{\max}=15500$ N/m²、両面スリットケーソンでは、 $p_{\max}=8500$ N/m² となり、両面スリットケーソンは片面スリットケーソンに比べて、同一の長周期波が作用した場合には、最大波圧は 0.54 倍に軽減される。したがって、長周期波対応岸壁は、従来のものより板厚を薄くし、経済的施工ができる。

5. あとがき

両面スリットケーソンを活用した港内長周期波吸収岸壁を提案した。片面スリット式の従来型よりも反射率が大きく低下することが示されたが、透水層の幅や粒径の大きさによる反射率の変化について検討をし最適な条件を求める予定である。最後に、両面スリットケーソン護岸の資料提供を受けた国土交通省関東地方整備局ならびに横須賀市港湾部の関係者の皆様に感謝します。

参考文献

- 岡安章夫・鈴木康之・花田昌幸 (1998): 碎波帯内長周期波の現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 286-290.
- 谷本勝利・吉本靖俊 (1982): 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, pp. 43-77.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則 (1995): 港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 301-305.
- 永瀬恭一・島田昌也 (2000): MARS 法を用いた数値波動水槽に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 391-395.
- 日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 104-106.
- 日本流体力学会 (1998): 流体力学ハンドブック, 丸善, pp. 305-306.
- 平石哲也・林恒一郎・栗田一昭・河野信二 (1996): リーフおよび港湾内における現地観測に基づく長周期波対策, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 206-210.
- 平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松渕 知・藤咲秀可・清水勝義 (1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料 No. 873, 39 p.
- 平石哲也・宮地 豊・石井幸生・佐藤峰雄・立石賢吾・松浦邦明・仲井圭二・山川 真 (2001a): 発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1356-1360.
- 平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001b): 南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1411-1415.
- 平山克也 (2001): ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 26-30.