

港湾内での利用形態に合わせた長周期波浪対策技術

The Measures Technology of Long Period Waves Matched to Purpose in Harbors

永瀬恭一¹・平石哲也²・押村嘉人³

Kyoichi NAGASE, Tetsuya HIRAIISHI and Katsuhito OSHIMURA

Long period waves cause large surging motion in mooring cargo vessels due to resonance. This can cause interruption in cargo handling and even break mooring rope when the ship surging motion becomes extremely large. A new type of sea wall composed of a double faced slit caisson backed by a rubble layer has been proposed in order to reduce the long period wave height in harbor. However this structure is very large and it can be difficult to construct in existing harbor. So, some alternative, more feasible proposals were assessed in terms of wave performance model experiments and numerical analysis.

1. はじめに

港湾に入射する長周期波浪は、波高が小さくとも船舶全体の動揺を誘発し、荷役障害や係留索の切断など事故の原因となるため、対策が早急に求められている（沿岸開発技術研究センター, 2004）。これまで、海中に投入した巨礫のエネルギー損失を確保して反射波を低減させる対策法（平石・永瀬, 2002）、導水板を利用してケーソン内で渦を発生させてエネルギー損失を図って消波する方法（大島・森屋, 2005）、共振効果を利用した方法（高橋・鈴木, 2005）などが提案されている。

著者らが、研究の当初に検討していた対策工法は2重スリットケーソンの背後に、直径30~80cm程度の巨礫を投入するもので、既に高潮対策用に建設された同じ構成の施設について、現地観測により長周期波浪に対する消波効果の確認などを行っている（平石ら, 2006）。

しかし、長周期波浪に対応するには波長に比例して大きな空間の確保が必要であり実際の港湾で長周期波浪の低減のために建設するには、港湾の形状や設置可能な場所に適した構造・規模にする必要があり、省スペースかつ低コスト化が求められる。

そこで、実用化を強く念頭においてこれらの課題を克服するために、スリットケーソン以外にも、L型ブロック係船岸を応用した構造物や、礫材のみを海中に投入して透水層のみを建設する工法を提案する。本研究では礫材を用いた長周期対策技術について、港湾内の様々な部分で利用する際に必要な設計手法の確立を目指して、MARS法を応用した数値解析（永瀬・島田, 2000）によって検証する。また、模型実験により解析精度の検証を行

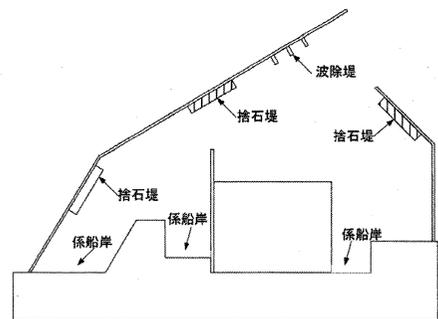


図-1 港湾内での長周期対策施設の設置位置

い、実用化のために検討資料の提供を目的とする。

2. 長周期波対策護岸の概要と検討方法

(1) 消波層を用いた長周期対策技術

透水層を用いた長周期対策護岸施設は、礫材を投入することで消波機能を発揮することができ、透過構造にすることや礫材と消波ブロックだけの構成で建設すれば、比較的地盤の悪い海域でも建設できるなどの利点がある。また、施設へ斜めに入射した場合でも、消波機能は確保される。一方で、比較的大きな空間を必要として、これまでの研究（平石・永瀬, 2003）で明らかにした長周期波の低減に効果がある奥行き30m程度の施設を港湾内で建設するには、様々な制約がある。したがって、実港湾で計画する場合には静穏度確保のために理想的な部分だけではなく、様々な海域への適用が考えられる。図-1は、実際の港湾での活用するための用途や設置が考えられる部分を示したものである。

そこで、様々な海域で長周期波を低減する具体的な方法として、図-2に示すような4つの形態を考えた。a)は波除堤など透過堤として活用するもので、b)は防波堤の前面に礫材のみを投入した場合である。c)およびd)は船

1 正会員 博(工) (株)フジタ 技術センター 基盤技術研究部
2 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部長
3 正会員 (株)フジタ 土木本部

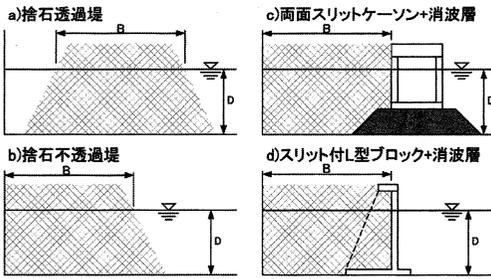


図-2 港湾内での利用形態

船の接岸や施設の小型化のため係船岸や両面スリットケーソンの背後に礫を投入したものである。

本研究では、これらの構造物について、主に数値解析によりその特性を明らかにする。また、水理模型実験により数値解析精度の検証も行った。

(2) 検討方法

解析は、永瀬・島田(2000)の3次元で水-空気混相を対象として、波面解析が可能なMARS (Multi-Advection Reconstruction Solver)法でこれまで長周期波施設の検討などに用いられている(平石, 2004)。波浪は造波ソースを用いて入射させ、反射波はエネルギー吸収層を設置して吸収させた。消波層での圧力損失は、近藤・竹田(1983)によるDupuit-Fochheimer則を用いて計算を行い、計算に必要な係数は別途透水試験によって検証した結果を用いた(平石・永瀬, 2004)。

入射波は現地スケールで、 $T=8, 15, 30, 45, 60, 100$ sの規則波を標準とし、必要に応じて $f=0.001\sim 0.050$ Hzの50波を重ね合わせたホワイトノイズ、孤立波を用いた。入射波高は現地での長周期波浪は10cm程度ではあるが、解析での分解能を確保するため $H=1$ mとした。一方、模型実験は、縮尺1/20として行い、消波層には $d_{50}=30$ mm(模型値)の砕石を用いた。

3. 捨石堤

船舶の接岸などの利用計画がない場合には、ケーソンなどの護岸が不要である。コストや港湾内での空間確保の点からも既設の護岸や防波堤前面に捨石のみの消波層を設置したり、消波層単独の透過堤としての設置が多いと考えられる。そこで、捨石堤として図-2に示したa), b)の形態について、MARS法を用いた数値解析によりその特性調べた。また、解析の実用性を検証するため水理模型実験を行った。

(1) 捨石透過堤

図-3に捨石透過堤の断面図を示す。沖側には1:4/3の勾配で消波ブロック(4t)を設置した。このブロックは、安定性を確保するだけでなく、長周期の吸収には単一粒径の礫材を用いた消波層を設けるだけでなく、沖側に粒

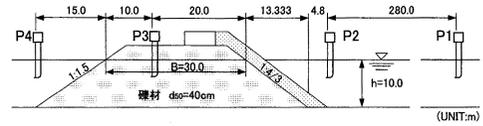


図-3 透過堤の断面(現地スケール)

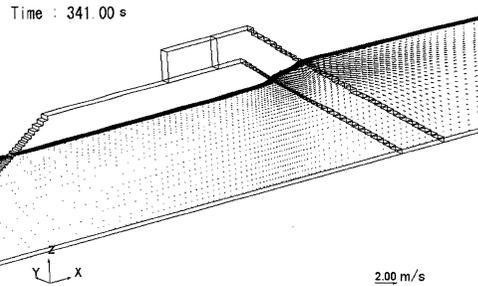


図-4 解析結果(捨石透過堤)

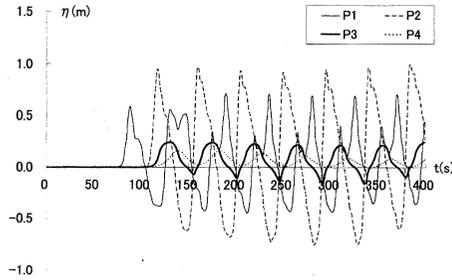
径の大きな透水層を設置することで、反射率の低減が可能なので消波機能の確保にも有効である(平石・永瀬, 2004)。この形態は、防波堤の内側に波除堤として利用されたり、港口などで波浪の侵入を防ぐために用いられる。

図-4は、解析結果の流速ベクトルを示したものである。解析条件は、透過堤の奥行きは図-3に示したとおり静水面の高さで $B=30$ mとした。捨石の粒径は $d_{50}=40$ cmである。模型実験は縮尺1/20で実施し、 $d_{50}=30$ mm(模型値)の砕石を礫材として利用している。消波ブロックの前面を遡上してその水面近くの流速が大きくなり、背後の礫材からなる消波層内に侵入していることが分かる。

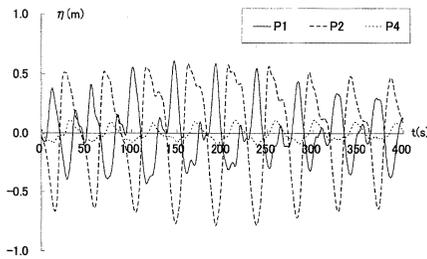
図-5は、現地スケールで周期 $T=45$ sの解析ならびに実験による波形である。(a)はMARS法による解析、(b)は水理模型実験の結果である。測点の設置位置は図-3に示すとおりで、実験では礫内の水位P3は計測できなかった。解析では $t=100$ sころ入射波が到達して透水層を通過したP4では波高0.2m程度の透過波が見られ、礫内のP3では0.3m程度の水面振動が認められる。

(b)実験波形では、実験の周期が $T=10$ sと、造波性能の上限での実験であり、反射波の吸収造波が十分に機能しておらず多重反射の影響などが見られたり、入射波高が現地スケールで80cm程度と解析より小さいなどの違いがある。また、解析では平均水位が、P4の平均水位の上昇なども見られる。しかし波形は、P1, P2, P4とも解析波形とよく対応している。

図-6に入射波の周期と反射率の関係を示す。解析を行った周期 $T=8, 15, 30, 45, 60, 100$ sの波形から反射率を合田ら(1976)の方法により求めた。水理模型実験の結果



(a)解析波形



(b)実験波形

図-5 捨石透過堤波形 (B=30m, T=45s)

も示したが、 $T=60, 100s$ に関しては、造波できなかった。消波層の入射方向の長さは $B=20, 30m$ について実施している。 $T=8, 15s$ では、解析による結果が実験より小さくなっているが、 $T=30, 45s$ では、解析により実験が精度よく再現することができている。

以上のように、MARS法を用いた数値波動水槽技術で、礫による消波層を用いた長周期対策施設の水利特性をよく再現できる。また、周期(波長)が長くなることにより消波性能が低減することがわかる。消波層の奥行き $B=20m$ において、 $T=100s$ における反射率があまり上昇しないのは、この構造物が透過堤であるためで、 $B=30m$ の透過率は $Kt=0.42$ であるのに対して、 $B=20m$ の場合には $Kt=0.49$ となっている。消波層が短く背後に透過したことで、反射率が低下したと考えられる。一方、 $B=30m$ では、透過しにくくなり反射率が上昇した。

また、解析では、 $f=0.001\sim 0.050Hz$ の50波を重ね合わせたホワイトノイズならびに孤立波でも解析を行った。その結果は、 $B=30m$ でホワイトノイズ $Kr=0.79$ 、孤立波 $Kr=0.69$ であり、前者では $T=60s$ 、後者では $T=45s$ の結果と同程度であり、 $B=20m$ でも同様の結果を得た。周波数スペクトルの2次モーメントから平均周期を求め、その1.2倍から有義波周期を求めると40s程度となる。40sの反射率を図-6から内挿すれば $Kt=0.7$ であり、この関係を考慮すれば反射率は少し大きな結果となっている。以上のような周期と反射率の関係は今後の長周期対策施設の

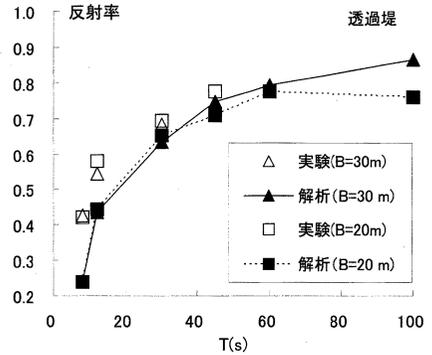


図-6 入射波の周期と反射率(捨石透過堤)

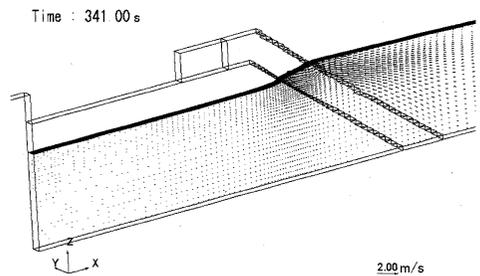


図-7 解析結果(捨石不透過堤)

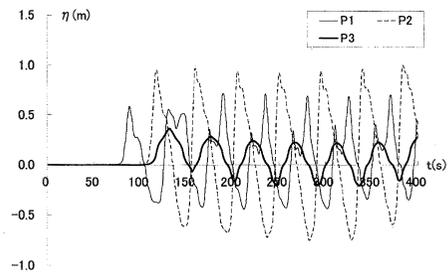


図-8 捨石不透過堤波形 (B=30m, T=45s)

検討に有効であると思われる。

(2)捨石不透過堤

図-2(b)に示した捨石不透過堤は、既設護岸の前面などに設置する場合の形態であり、港湾の奥などに設置して長周期波浪の反射を低減するために用いられる。図-7は、この形態の数値解析結果の断面図である。解析方法は捨石透過堤と同じである。静水面の高さで $B=30m$ となる部分より背後には波浪が伝わらないように、消波層の後部を不透過としている。図-4と同様に波浪ブロックと礫材の境界部分を遡上するように運動したのち礫内部に侵入している。図-8は $T=45s$ の解析で得られた波形である。図-5(a)の波形と余り大きな変化は見られないが、

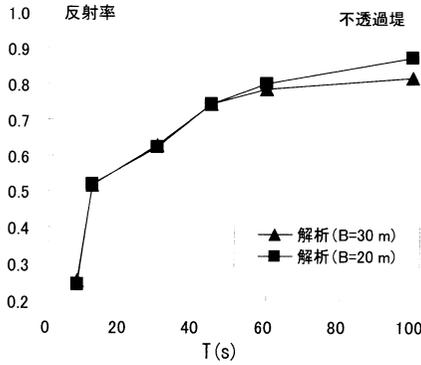


図-9 入射波の周期と反射率(捨石堤)

消波層の最も奥にあたるP3での水面変動は捨石透過堤の1.7倍程度となっている。背後の構造物で反射しているためと考えられる。しかし、P1などの波形は捨石透過堤と大きな違いが見られない。

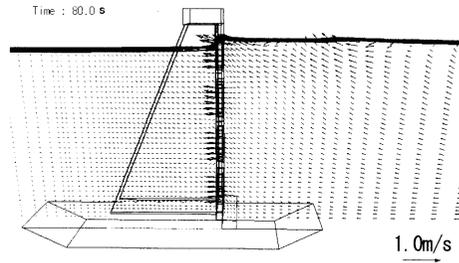
図-9は、図-6と同様に入射波の周期と反射率の計算結果を整理したものである。こちらも捨石透過堤の場合とほとんど違いが見られない。T=100sについては、B=20mの方が5%ほど大きく、消波層の中での減衰が進まず施設外へ反射しているようである。B=30mの場合には、捨石透過堤が $K_r=0.865$ に対して $K_r=0.815$ と若干小さくなっている。また、ホワイトノイズによる解析結果は $K_r=0.757$ (B=30 m)であり、捨石透過堤と同様にT=60sとほぼ同じ結果が得られた。

4. スリット付L形ブロックを用いた対策施設

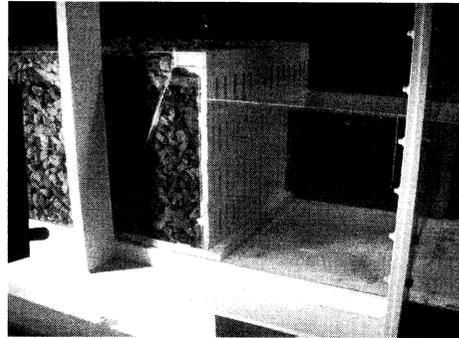
消波層による長周期波対策施設を、船舶が接岸する必要のある部分に建設する場合には、これまで、図-2に示したc)のような両面にスリットを設けて波浪が透過するようなケーソンを建設して、その背後に透水層を設置する方法を検討してきた。しかしながら、港湾内ではスペースの確保が困難な場合が多く、省スペース化やコストダウンを求められる。係船岸として利用される部分や港湾奥のこれらの海域では比較的波浪が小さい場合が多い。そこで、これらの海域で利用する係船岸の形式として、L型ブロック係船岸が提案されている(沿岸開発技術研究センター, 2006)。このL型ブロック係船岸にスリットを設けて、その背後に30 m程度の透水層を設ける方法を提案する。

スリットの開口率に関しては、これまでの両面スリットケーソンを用いた検討で50%と20%について検討を行ってきたが、大きな違いが見られなかったため構造上有利な20%を採用した。

消波機能の検討は、MARS法を用いた3次元の数値解



(a) MARS法による3次元解析状況



(b) 実験状況

図-10 スリット付L型ブロックを用いた対策施設の検討状況

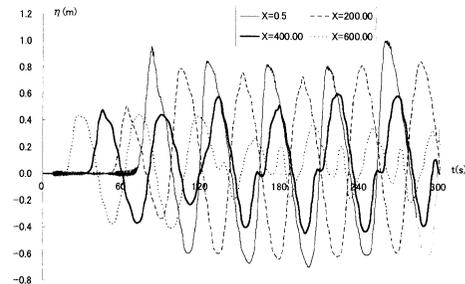


図-11 解析波形(礫材直径60 cm, T=45 s)

析、ならびに水理模型実験で行った。図-10にその状況の写真と解析のベクトル図を示す。図-10(a)の解析断面を見れば、スリット部を通過した波浪が礫材の消波層の中に進行して、減衰していくことがわかる。図-11は解析で得られた波形で図中のX=0.05, 200, 400, 600はスリット前面からの距離(m)である。

図-12は合田ら(1976)による入反射波分離計算で求めた結果を周期で整理したものである。これまでと同様に周期が長くなるに従い反射率が大きくなるのが分かる。T=30, 45sでは実験値が5%程度大きくなっているが、比較的良好的な再現性を有している。他の形態との比較は後で説明するが、透過堤などと同様の結果を得ることができた。

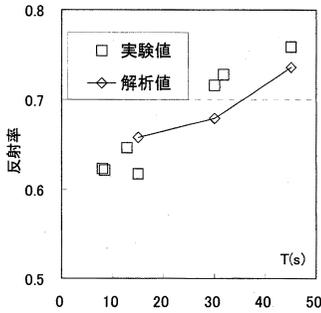


図-12 反射率の比較

5. 港湾内での用途・形状ごとの消波機能の比較

図-2に示した4つの形態に関して実施した模型実験やMARS法を用いた解析結果のうち、反射率を施設の奥行き長さと言長の比B/Lで整理して図-13に示す。本研究で説明しなかった両面スリットケーソンと消波層を組み合わせた場合の結果については、平石・永瀬 (2003) の結果を用いている。すべての構造物で、B/Lが小さくなると反射率が大きくなり、長周期波浪の消波特性が理解できる。

特に、捨石透過堤、捨石不透過堤、スリット付L型ブロック+消波層を用いた3つの形態において、反射率にはほとんど違いが見られない。一方、c)はスリット部分のエネルギー低減効果が期待できるので、周期が小さくなると反射率が大きく低減する。a), b)では構造物の安定を図るため沖側の礫材の粒径を大きくしたり異型ブロックの併用が現実的である。平石・永瀬 (2003) によると、沖側に比較的粒径の大きな消波層を配して徐々に粒径を小さくして波浪のエネルギーロスを図ることで消波層の奥行きを小さくすることが可能なことが分かっている。導水板を利用してケーソン内で渦を発生させてエネルギー損失を図る方法 (大島ほか, 2006) でも同じような評価を行っている。波高0.25mと本研究よりも反射しやすい条件を用いているが、同じような結果が得られている。

6. おわりに

透水層を用いた長周期対策技術について、現地港湾に適用する場合に利用可能な4つの構造形態について、MARS法を用いた数値波動水槽技術ならびに水理模型実験を応用して水理特性を検証した。その結果、以下のこ

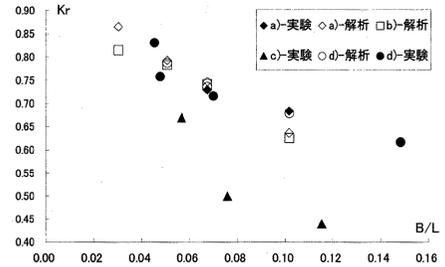


図-13 形態による反射率の特性

とが明らかになった。

- a) 礫材を消波材として利用することで、様々な施設を提案できることを示した。港湾計画の中で、利用可能な部分は限られその条件に応じて様々な形態を提案・選択することができる。
- b) L型ブロック係船岸にスリットを付加した構造物の背後に礫材を投入する構造を提案したが、捨石透過堤と同程度の反射率低減効果が得られた。

参考文献

沿岸開発技術研究センター(2004)：港内長周期波浪影響評価マニュアル，沿岸開発技術ライブラリーNo.21，86p.
 沿岸開発技術研究センター(2006)：L型ブロック式係船岸技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリーNo.22，35p.
 大島香織・森屋陽一(2005)：導水板によるスリット構造物の長周期波浪特性，海洋開発論文集，Vol. pp.791-796.
 大島香織・森屋陽一・水流正人・杉田繁樹・平石哲也(2006)：渦による消波機能を活用した長周期波対策施設の特性，海洋開発論文集，第22巻，pp.145-150.
 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976)：不規則波実験における入射波の分離推定法，港研資料，No.248，24p.
 近藤淑朗・竹田英章(1983)：消波構造物，森北出版，275p.
 高橋重雄・鈴木高二朗(2005)：共振効果による長周期波の消波システムの原理と基本特性，海岸工学論文集，第52巻，pp.696-700.
 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，海講論文集，第46巻，pp.391-395.
 平石哲也・永瀬恭一(2002)：流体直接解析法による長周期波対策護岸の性能検討，海岸工学論文集，第49巻，pp.686-690.
 平石哲也・永瀬恭一(2003)：長周期波対策護岸の性能検討実験，海岸工学論文集，第50巻，pp.801-805.
 平石哲也(2004)：長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算，港空研資料，No.1093，21p.
 平石哲也・奥野光洋・安藤興太(2006)：砂礫層内における長周期の水流動に関する現地観測，港空研資料，No.1130，28p.