

礫材の消波機能を活用した長周期波浪対策施設の現地適用技術

永瀬 恭一 押村 嘉人 *

概 要

港湾に外洋から侵入する長周期波浪対策が早急に求められている。これまで、礫材を用いた消波技術について検討を行ってきたが、新たに透水性を持たせるためにスリットを設けたL型ブロック係船岸を用いた方法を提案して、水理実験ならびに数値解析によりその水理特性を検証した。また、これまでに検討を行ってきたいくつかの形態を有する構造物の消波特性を比較して、実際の港湾で活用する場合の検討資料として整理した。

Developments of long period wave absorbing systems using gravel materials and their applicability to harbours

Abstract

Long period waves cause large surging motions in mooring cargo vessels due to resonance. This can cause interruptions to cargo handling and even break mooring ropes when the ship's surging motion becomes extremely large. In order to cope with this problem and to reduce the wave height of the long period wave in harbors, a wave-absorbing technology using gravel materials was previously developed. In addition, a berth system using an L-shaped double faced slit caisson backed by a rubble layer and filled with gravel materials was developed. In this report, the hydraulic characteristics of the newly developed berth system were examined by using wave performance model experiments and numerical analysis. Also, comparisons among the developed systems were made to show the applicability of each system to the actual harbours.

キーワード：長周期波 L型ブロック係船岸
礫材 MARS法

* 土木本部

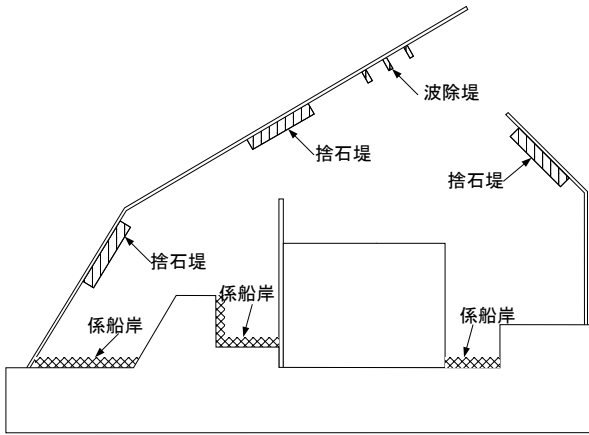


図1 港湾内での長周期対策施設の設置位置

§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¹⁾。著者らは、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について、水理模型実験や数値解析を通して検証を続けてきた^{2), 3)}。他にも、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⁴⁾、共振効果を利用した方法⁵⁾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、その効果については高潮対策用に建設された同様の施設において、現地観測を行い長周期波浪に対する消波効果の確認などが行われている⁶⁾。

一般に、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の施設を建設するには、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、省スペース化かつ低コスト化が求められる。

そこで、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の採用が現実的である。本研究は、実用化を強く念頭においてL型ブロック係船岸を応用した構造物の長周期波低減効果について、水理模型実験を行って検証した。また、長周期波は波長や構造物が大きい割に波高が小さく、従来の構造物にくらべて水理模型実験の実施が難しいことから、MARS法を応用した数値解析⁷⁾によって検証する。以上の検討から、実用化の計画や設計に際して、利用可能な資料を整理することを目的とする。

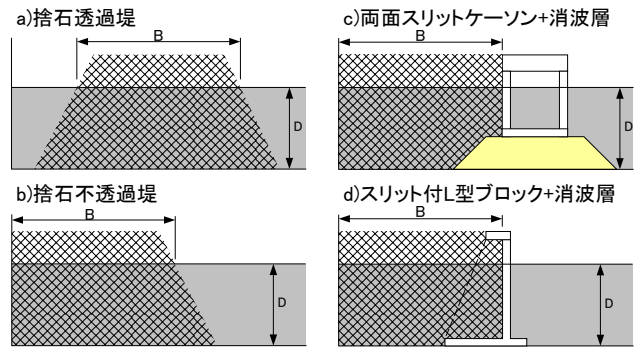


図2 港湾内での利用形態

§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³⁾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。

また、様々な設置場所の条件に対応した具体的な方法として、図2に示すような4つの形態が考えられる⁷⁾。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)は船舶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、a)ならびに新しくd)の構造物に対して数値解析、水理模型実験によりその特性を明らかにする。

(2) 検討方法

解析は、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⁸⁾でこれまで長周期波施設の検討などに用いている²⁾。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、Dupuit-Fochheimer則^{9), 10)}を用いて計算を行う。Dupuit-Forchheimer則による圧力損失は、

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = (\alpha + \beta|q|)q \quad (1)$$

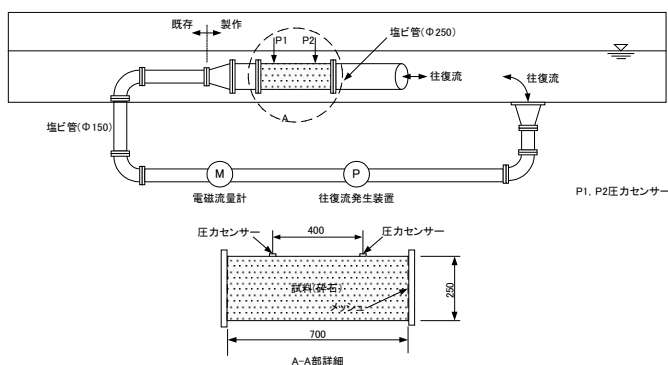


図3 透水試験装置



写真1 試験容器

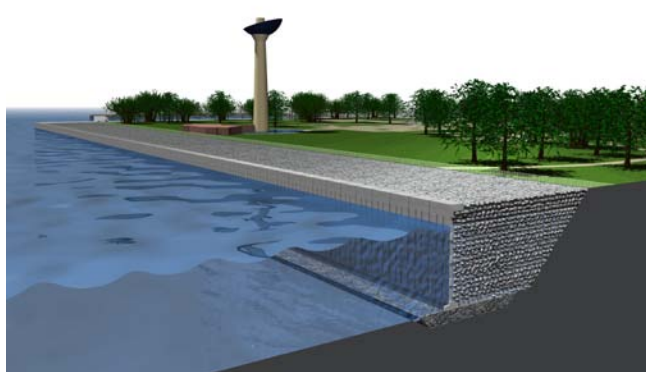


図4 スリット付L型ブロック係船岸



写真2 造波実験の状況

で与えられ、 α と β は、

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\mu}{d^2}, \beta = \beta_0 \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (2)$$

である。ここに、 d : 礫材の粒径、 λ : 空隙率、 $q = \lambda u$ で α_0, β_0 は透水層を構成している材料から求まる係数である。この係数を決定するために、図3に示す装置で透水試験を行った。直径 250mm、長さ 700mm の塩ビ管の両端に金属製の網を取り付け、その内部に試験を行う砕石ならびにコンクリートブロックの模型を充填した。塩ビ管の片側に往復流発生装置を取り付け、電磁流量計で流量を制御しながら通水し、塩ビ管の2点に据え付けた圧力センサーによって水圧を測定した。2点の圧力差と流速から係数 α_0, β_0 を算出した。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。

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 10 cm 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。

§3. 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浪対策施設を、船舶が接岸する必要が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。また、写真2は水理模型実験の状況である。このような構造物にすることで、省スペース化と多目的利用が可能になる。

スリットの開口率に関しては、これまで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ので構造上有利な 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

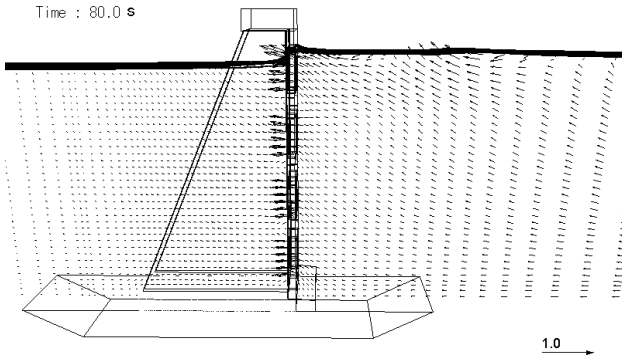


図5 MARS法による3次元解析状況

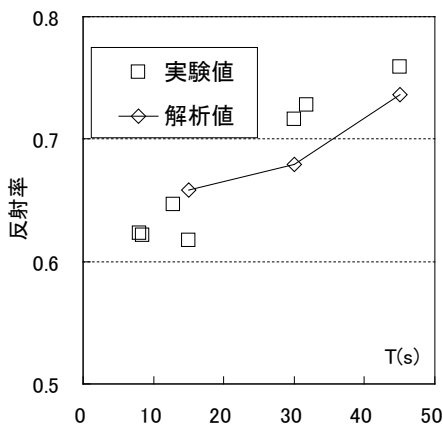


図7 反射率の比較

析、ならびに水理模型実験で行った。図5 解析のベクトル図を示す。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6 は解析で得られた波形で図中の X=0.5、200、400、600 はスリット前面からの距離(m)である。

図7 は、入反射波分離計算¹²⁾で求めた結果を周期で整理したものである。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、45 s では実験値が5%程度大きくなっているが、比較的良好な再現性を有している。

§4. 捨石堤⁷⁾

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不透過堤として設置したり、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を調べた。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。ここでは、紙面の関

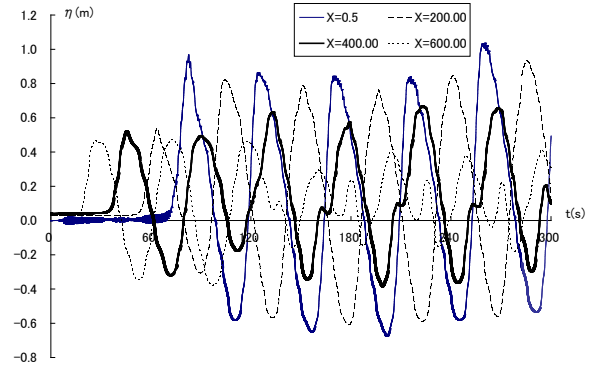


図6 解析波形(礫材直径 60 cm, T=45 s)

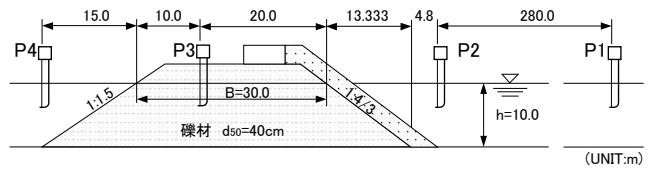


図8 透過堤の断面(現地スケール)

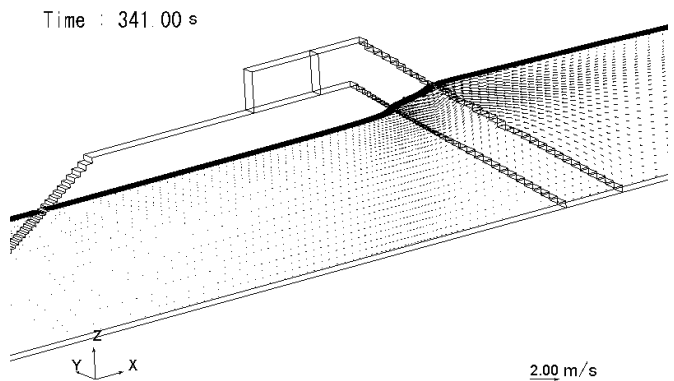


図9 解析結果(捨石透過堤)

係から、a)捨石透過堤に関する結果のみを示す。

図8 は検討を行った捨石透過堤の断面図である。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³⁾。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9 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、透過堤の幅は図8 に示す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。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。

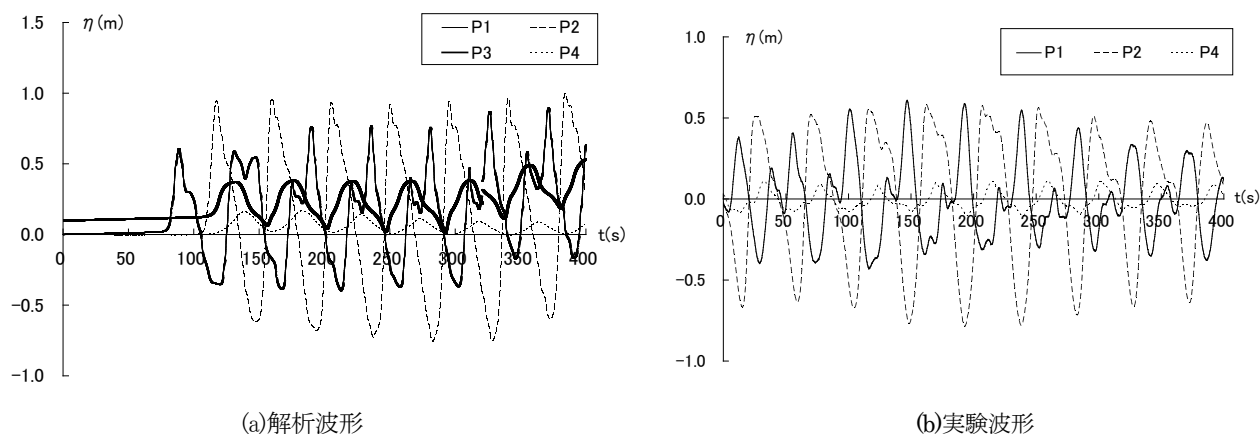


図 10 捨石透過堤波形 (B=30 m, T=45 s)

図 10 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、(a)は MARS 法による解析、(b)は水理模型実験の結果である。模型実験は縮尺 1/20 で実施し、 $d_{50}=30$ mm(模型値)の碎石を礫材として利用している。測点の設置位置は図 8 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 に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。

図 10(b)に示した実験波形は、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 とともに解析とよく対応している。

図 11 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入射分離計算¹²⁾により求めて整理する。水理模型実験の結果も示したが、 $T=60, 100$ s 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 $B=20, 30$ m について実施している。 $T=8, 15$ s では、解析による結果が実験より小さくなっているが、 $T=30, 45$ s 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 $B=20$ m において、 $T=100$ s 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、 $B=30$ m の透過率は $Kt=0.42$ であるのに対して、 $B=20$ m 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

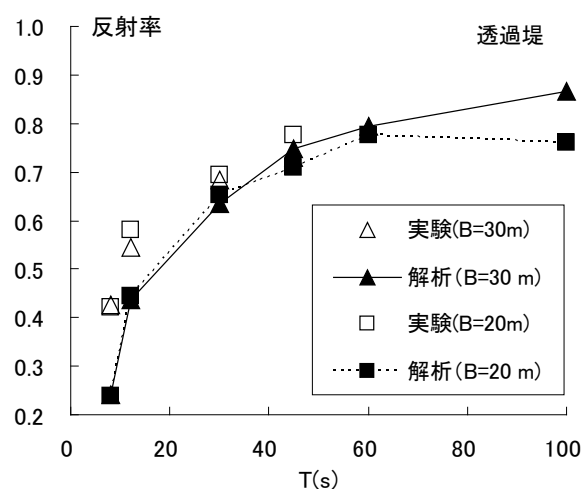


図 11 入射波の周期と反射率 (捨石透過堤)

とで、反射率が低下したと考えられる。一方、 $B=30$ m では、透過しにくくなり反射率が上昇した。

また、解析では、 $f=0.001\sim 0.050$ Hz 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、 $B=30$ m でホワイトノイズ $Kr=0.79$ 、孤立波 $Kr=0.69$ であり、前者では $T=60$ s、後者で $T=45$ s の結果と同程度であり、 $B=20$ m 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 40 s 程度となる。40 s の反射率を図 11 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検討に有効であると思われる。

§5. 用途・形状ごとの消波機能の比較⁷⁾

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 λ と波長の比 B/L で整理して図12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³⁾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。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でも同じような評価を行っている¹³⁾。本報告では波高1mとして検討を行っているのに対して、波高0.25mとより反射しやすい条件を用いているが、同様の結果が得られている。

§6. おわりに

礫による透水層を用いた長周期対策技術について、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、以下のことが明らかになった。

- a) スリットを付加したL型ブロック係船岸の背後に礫材を投入する構造を提案した。解析・実験の結果、捨石透過堤と同程度の反射波低減効果が得られた。
- b) 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。これまで提案した工法を、現地の条件に応じた形態を採用することが可能なので、港湾での提案・検討に有効な資料を整理することができた。

謝辞 本報告は、(独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 平石哲也部長と共著の論文における研究成果^{2), 3), 7), 9)}に、当社で行った水理模型実験を加えたものです。また、数値解析手法の開発⁸⁾には(株)ソフトウェアクレイドル 島田昌也氏の協力を得ました。ここに記して、両氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター(2004): 港内長周期波影響評価マニュアル、沿岸開発技術ライブラリーNo.21、86p.
- 2) 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

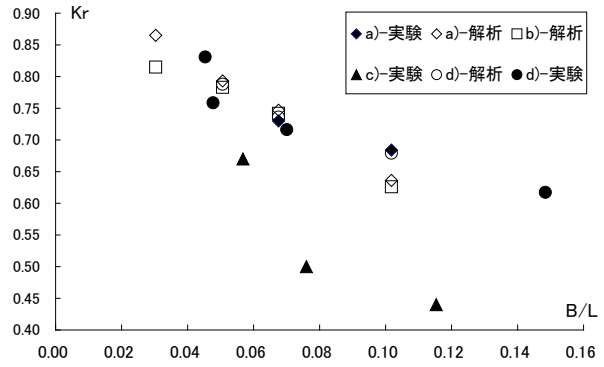


図12 形態による反射率の特性

- 3) 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、pp801-805。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 永瀬恭一・平石哲也・押村嘉人(2008): 港湾の利用形態に対応した長周期波対策技術、海岸工学論文集、第55巻。(投稿中)
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 近藤淑朗・竹田英章(1983): 消波構造物、森北出版、275p。
- 11) 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。
- 12) 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反射波の分離推定法、港研資料、No.248、24p。
- 13) 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。

ひとこと



永瀬 恭一

Mars法を用いた数値波動水槽を用いて様々な構造物の解析を行ってきました。設計・計画ツールとして今後も発展させていきたいと思っています。