

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1205

December 2009

長周期波対策工の消波性能について

平石 哲也

平山 克也

小澤 敬二

森屋 陽一

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 捨石堤を活用した港内における長周期波対策	4
2.1 長周期波対策法の種類	4
2.2 捨石型長周期波対策工の性能検討法	5
2.3 捨石型長周期波対策工の消波効果の比較	7
3. 渦消波型の長周期波対策工の性能	10
3.1 渦消波型対策工の基本形状と実験方法	10
3.2 渦消波型対策工の反射率	11
4. 長周期波対策工の現地適用性試験	12
4.1 現地試験の概要	12
4.2 ブシネスク型波浪計算法を用いた反射率の推定	13
5. 結論	15
参考文献	16

Wave Absorbing Capacity of Long Period Wave Countermeasures in Harbor

Tetsuya HIRAISHI*
Katsuya HIRYAMA**
Keiji KOZAWA***
Yoichi MORIYA****

Synopsis

Long period waves have often caused the interruption of cargo handling and break of mooring lines in harbors bordering to the Pacific Ocean and Japan Sea. Several countermeasures against the long period wave disturbance have been proposed since the authors revealed the mechanism of their transformation in harbors in 1996. One of such countermeasures is “long period wave absorber” mainly composed of wide rubble layer behind breakwaters to prevent the amplification of long period waves by multi-reflection in harbors.

The numerical analysis for applicability of various type long period wave absorbing countermeasures has not been fully carried out though several types of long period wave countermeasures are proposed. The paper describes the variation of long period wave reflection coefficient for the four rubble mound type absorbers and the eddy absorbing type countermeasure. Secondly, a field observation of long period wave reflection for a rubble detached breakwater installed behind the main caisson-type breakwater is introduced.

The main conclusions are as follows;

- i) The long period wave reflection coefficient of various rubble layer type countermeasures is evaluated in a diagram for B/L (width of rubble layer/ wave length).
- ii) The reflection coefficient of eddy absorbing type countermeasure becomes less than 0.6 for a specified wave period.
- iii) The observed wave reflection coefficient in the field test agrees well to the estimated one.

Key Words: Long period waves, Long period wave countermeasure, Long period wave reflection coefficient, Rubble type breakwater, Eddy absorbing type seawall

* Director, Maritime Environment and Engineering Department
** Leader, Wave Research Team, Maritime Environment and Engineering Department
*** Director, Akita Port Construction Office, Tohoku Regional Land Infrastructure Bureau
****Senior Researcher, Coastal Development Institute of Technology
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-8445036 Fax : +81-46-8411274 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

長周期波対策工の消波性能について

平石 哲也*
平山 克也**
小澤 敬二***
森屋 陽一****

要 旨

周期数十秒～数分の長周期波は、我が国の太平洋や日本海に面した大型港湾において、しばしば荷役障害や係留索の切断等の事故を起こしてきた。著者たちが1996年に港湾における長周期波被害のメカニズムを明らかにして以来、様々な対策法が提案されてきた。それらの有望な対策法の一つとして、幅の広い捨て石堤を港内に設置して、長周期波の港内での多重反射による増幅を防止する手法がある。これまでに、構成が異なる捨て石堤や渦を発生させて反射波を防ぐ渦消波堤などが別個に提案されてきたが、それらの効果を統一して比較した試みはなされていない。本研究では、各種タイプの港内長周期波対策工の反射率を1枚の図面で比較すると共に、現地で試験的に設置された港内捨て石堤の適用性を調べた。得られた主な結論を以下に示す；

- i) 捨て石堤型の長周期波対策工の反射率は、 B/L (堤幅/波長) によって変化し、推定図が得られた。
- ii) 渦消波型の対策工は、特定の周期について大きな効果を有し、反射率を0.6以下にすることができる。
- iii) 現地で設置された港内捨て石堤の反射率について、観測から得た値は、設計時の推定値と一致した。

キーワード：長周期波，長周期波対策，長周期波の反射率，幅広捨て石堤，渦消波型護岸

* 海洋・水工部長
** 海洋・水工部波浪研究チームリーダー
*** 東北地方整備局秋田港湾事務所長
**** (財)沿岸技術研究センター調査部主任研究員
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5036 Fax：046-841-1274 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

1. まえがき

我が国の太平洋や日本海に面する大型の港湾では、沖合から入射する周期 30s~300s の長周期波によって、係留船舶と係留索からなる係留系の固有振動が励起され、大きな水平運動が発生することが多い。水平運動は、船首-船尾方向のサージ動揺量が顕著で、荷役障害や係留索の切断につながる危険性が多い。著者らは、苫小牧港における現地観測をもとに、長周期波の発生メカニズムを検討してきた(平石ら, 1996)。次に、数値解析を中心として、長周期波による荷役障害への対策法を提案した。対策法としては、1)防波堤を延伸して、沖合から侵入する長周期波を抑止する、2)係留系を改良したり、陸上から硬いロープで係留して、動揺を防ぐ(米山ら, 2003)、3)長周期波の発生時と大きさを予測して、接岸時刻や荷役時間を調整する、4)港内で長周期波のエネルギーを吸収できる消波層を設けて、港内での増幅を防ぐ等が考えられている(沿岸技術センター, 2004)。

この中で、1)は宮崎県細島港の防波堤建設として実現されつつあるが、整備に時間を要するため、効果が発現するまでに相当の時間が必要になる。2)は、宮城県石巻港における陸上ウインチとして試験的に運用されており、船舶の動揺低減に効果があることが確認されている(米山ら, 2008)。しかし、毎年の維持管理や、運用時の作業員の確保など恒久施設として使用するためには課題が残されている。3)は沿岸技術センターの港内波浪予測システム(COMINS)のオプションとして供給されている(渥美ら, 1997)が、長周期波による荷役障害を解決したわけではなく、あくまでも安全性の確認ツールとして機能させるべきものである。4)の消波層を設ける手法は、比較的建設コストが小さく短期間で整備できるので、長周期波による荷役障害がすでに生じている港湾で応急対策として注目されている。2007年から秋田港の主防波堤の港内側に試験的に設置されたのをはじめとして、2009年8月現在、苫小牧港でも施工がはじまっている。海中に投入した粒径数十 cm の礫材層による消波効果(反射率)については、平石ら(2002)が模型実験等で明らかにしているが、このほかにも、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(大島・森屋, 2005)や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。ただし、砂礫層を設置する際には、防波堤に密着させたり、個別のコンクリート板で支持をするなど、設置場所や施工法によって数種類の構成が考えられ、構成毎の適用性を比較した検討例はない。

平石(2004)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、前述のように、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、永瀬ら(2008)は、スリットを有する L 型ブロック係船岸(沿岸技術センター, 2006)の消波施設への活用を提案している。

本研究では、実用化を強く念頭において、永瀬ら(2008)の実験結果を中心に、既存データを整理して、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長周期波対策工法の性能を検討した。反射率は、これまでに浸水解析等で実績がある MARS 法を応用した数値解析(永瀬ら, 2000)と造波実験や透水試験などの水理模型実験によって計算する。また、導水板を利用した対策工についても、著者らの実験結果(大島ら, 2006)を中心に、その効果を検討した。最後に、秋田港で試験的に設置された港内砂礫層の性能について現地観測結果を紹介する。

2. 捨石堤を活用した港内における長周期波対策

2.1 長周期波対策法の種類

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、ケーソンなどの構造物を用いる方法に比べて、港湾の様々な部分に設置可能な利点がある。図-1 は、港湾にこの方法を活用するための方法や設置が考えられる部分を示したものである。しかし、提案している構造物は比較的大きな空間を必要として、これまでの研究(平石ら, 2003)で明らかにした長周期波の

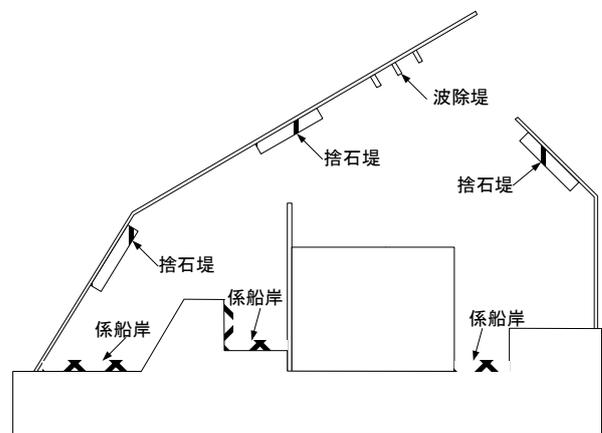


図-1 港内の消波工による長周期波対策のイメージ

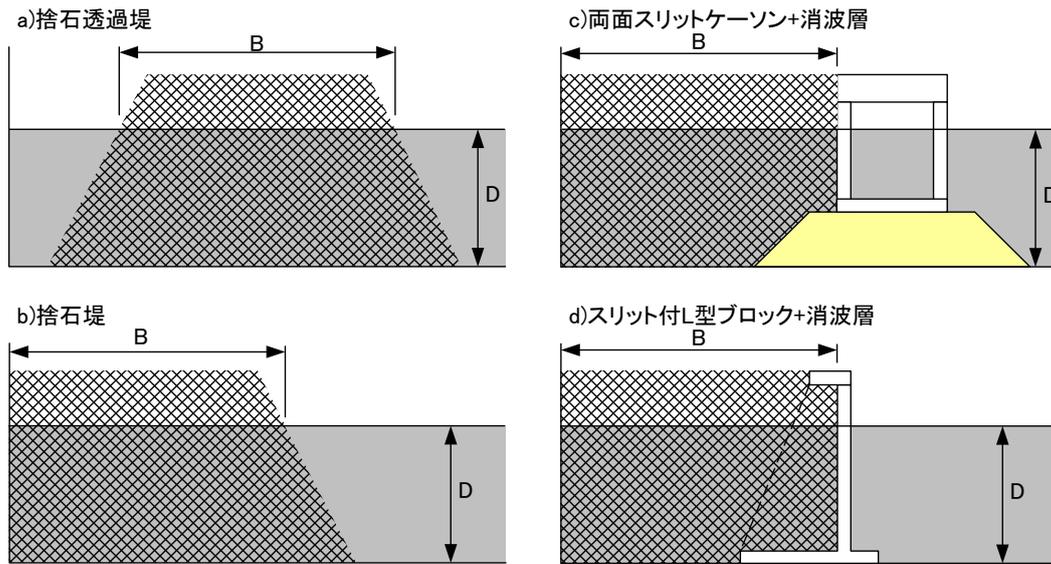


図-2 礫材を用いた対策工の構成によるタイプ分類

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。そこで、図-2 に示すような実海域で利用するために現実的な4つ形態を考えた。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、c)および d)は両面スリットケーソンやL型スリット付きブロックの背後に礫を投入したものである。

2.2 捨石型長周期波対策工の性能検討法

本研究では、2.1 で示した構造物について、水理模型実験ならびに数値解析を実施してその特性を明らかにする。ここでは、単純な傾斜型の捨石堤を例として、反射率等の解析法を示す。なお、平石ら(2006)は捨石堤における風波の透過率や反射率を同様な手法で求めており、実験法や計算法の詳細は既資料を参考にされたい。

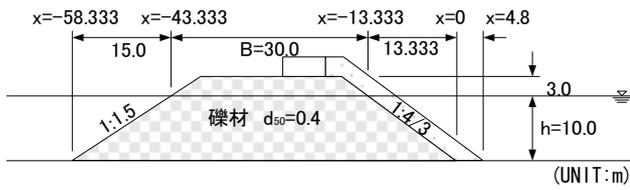
ここでは、提案した長周期波対策工のうち、a)の捨石堤の水理特性を明らかにするため模型実験と数値解析を行った。模型実験は、縮尺 1/20 として行い、消波層には $d_{50}=30\text{mm}$ の砕石をもちいた。解析は、永瀬ら(2000)の3次元で水-空気混相を対象として、波面解析が可能な MARS (Multi-Advection Reconstruction Solver)法である。波浪は造波ソースを用いて入射させ、反射波はエネルギー吸収層を設置して吸収させた。消波層での圧力損失は、近藤ら(1983)による Dupuit-Fochheimer 則を用いて計算を行い、計算に必要な係数は別途透水試験によって検証した結果を用いた(平石, 2004)。入射波は現地スケールで、 $T=8, 15, 30, 45, 60,$

100s の規則波を標準とし、必要に応じて $f=0.001\sim 0.050\text{Hz}$ 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 $H=1\text{m}$ とした。

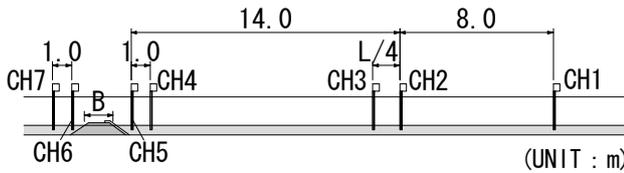
図-3 (a)および(b)に捨石透過堤の断面図と実験時の波高計配置を示す。沖側は 1:4/3 の勾配で被覆材として消波ブロックを設置した。このブロックは消波層全体の風波に対する安定性を確保することが目的である。加えて、内部の捨石消波層と粒径が異なる層を構成することで、長周期波に対する反射率を捨石層だけの場合よりも低下させることができる(平石, 2004)。この形態は、防波堤の内側に波除堤として利用したり、港口などで波浪の侵入を防ぐために用いることができる。

図-4 は、解析結果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 $B=30\text{m}$ とした。捨石の粒径は $d_{50}=40\text{cm}$ である。ここでは、紙面の都合により解析による断面図のみを示したが、別途縮尺 1/20 による模型実験も実施し、 $d_{50}=30\text{mm}$ の砕石を礫材として利用している。

図-5 は、現地スケールで周期 $T=45\text{s}$ の解析ならびに実験による波形である。(a)は MARS 法による解析波形である。(b)は水理模型実験による波形で、CH4~7 設置位置は図-3 に示してある。解析では $t=100\text{s}$ ころ入射波が到達して透水層を通過した $X=-58.333$ では波高 0.2m 程度の透過波が認められる。また、 $X=200$ の波形などには正弦波の入射波に反射波が重なっている状況が見られる。同様に実験波形にも透過波・反射波が認められるなど、両者は良く対応した波形を示している。



(a) 透過型の捨石堤の断面



(b) 実験水路での波形観測点

図-3 透過型の捨石堤 (タイプ(a)) の実験模型

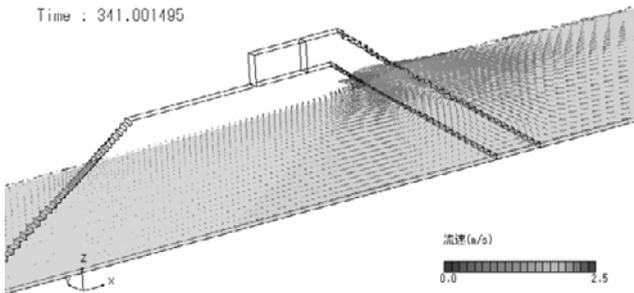
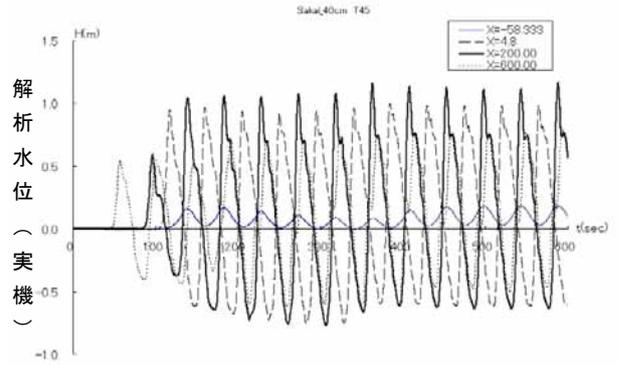


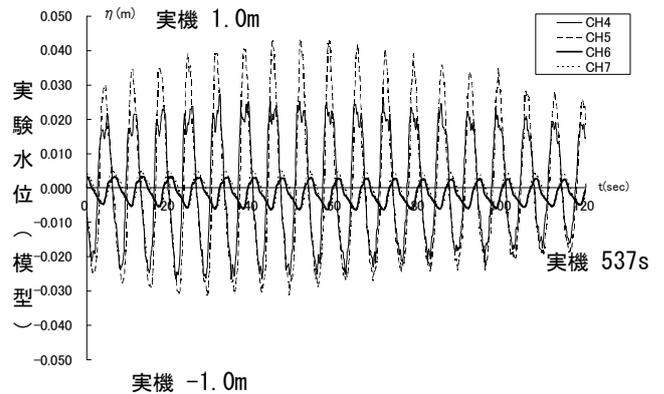
図-4 数値計算で求めた捨石層内の流れ

図-6 に入射波の周期と反射率の関係を示す。反射率は、解析を行った周期 $T=8, 15, 30, 45, 60, 100$ s の波形から合田ら (1976) の方法により求めた。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。消波層の奥行きについては $B=20, 30$ 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、 $T=30, 45, 60$ 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。また、 $B=20$ m の場合に、 $B=30$ m に比べて反射率が大きくなる傾向も、実験値と解析値でよく一致しており、実験値が得られないケースでは、解析値で反射率が推定できることが判った。

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、 $B=30$ 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



(a) 解析波形



(b) 実験波計

図-5 捨て石透過堤における波形変化($B=30$ m, $T=45$ s)

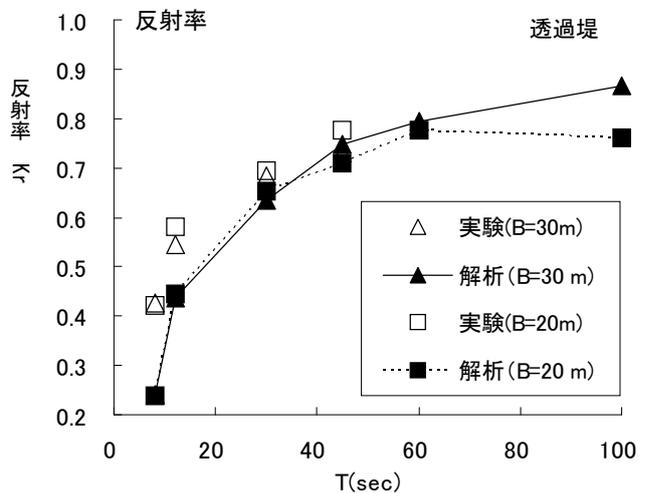


図-6 波周期と反射率 (透過型捨石堤)

なっている。

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 $K_r=0.79$ 、孤立波 $K_r=0.69$ 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。入射計算の方法に

もよるが、入力したホワイトノイズのうち、比較的短周期側の波浪によって反射率が説明できることは、今後の長周期対策施設の検討に有効である。図-6 に示すように模型実験結果と本研究で用いる数値解析法の結果は、ほぼ一致する。そこで、他のタイプの捨て石型対策工については、できるだけ実験結果を用いて反射率を決定するものの、実験できないケースや模型を製作できない場合には、数値解析による予測値を採用する。

2.3 捨て石型長周期波対策工の消波効果の比較

(1) タイプ(b)不透過型捨て石堤

図-2 (b)に示した不透過型捨て石堤は、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。解析方法は透過型の捨て石堤と同じである。静水面の高さで $B=30\text{ m}$ 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。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。このタイプは、タイプ(a)と基本的に同じ構造であるため、模型実験は実施していない。タイプ(a)との違いは、直立防波堤との間に遊水空間を有しておらず、礫材が直接、直立壁に設置していることである。

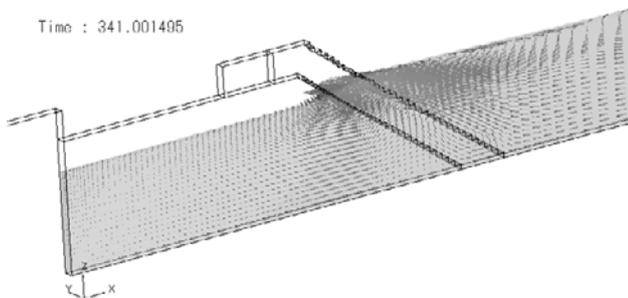


図-7 タイプ(b)不透過型の捨て石堤の計算モデル

図-8 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。こちらも透過型捨て石堤の場合とほとんど違いが見られない。 $T=100\text{ s}$ については、 $B=20\text{ m}$ 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。 $B=30\text{ m}$ の場合には、透過型捨て石堤が $K_r=0.865$ 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 $K_r=0.757(B=30\text{ m})$ であり、 $T=60\text{ s}$ とほぼ同じ結果が得られた。

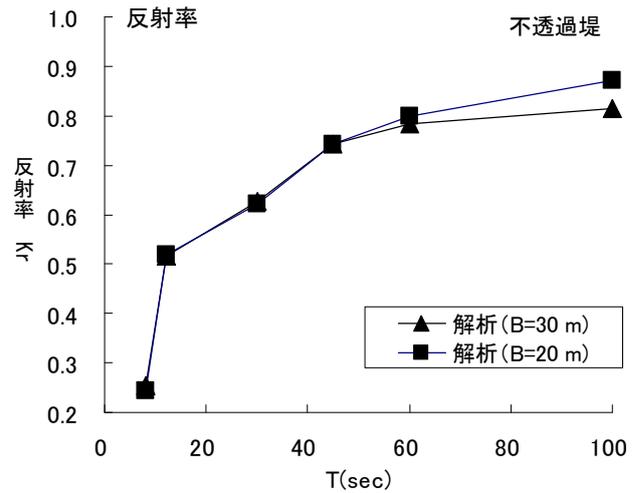


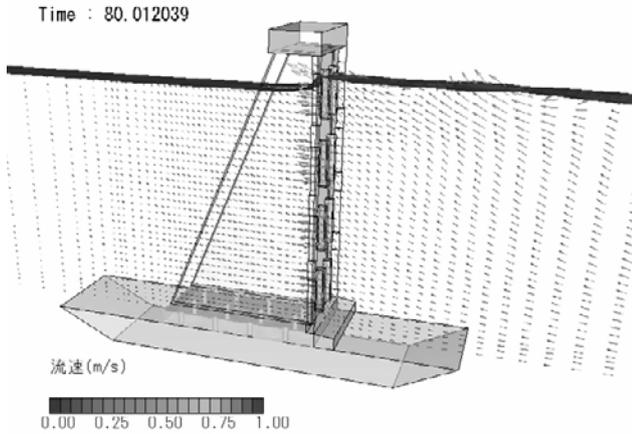
図-8 タイプ(b)不透過型捨て石堤の反射率

(2) スリット付きL型ブロック堤

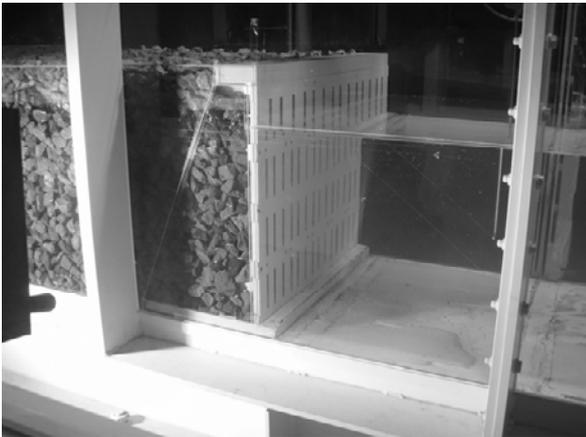
タイプ(d)のスリット付きL型ブロック堤は、水深が大きくなり、捨て石堤ではのり先幅が広がってしまい、大きな水域を必要とする場合に設置できるタイプであり、護岸の改修時などの活用できる。消波層による長周期波対策施設を、船舶が接岸する必要のある部分に建設する場合には、これまで、図-2 に示した c)のような両面にスリットを設けて波浪が透過するようなケーソンを建設して、その背後に透水層を設置する方法を検討してきた。しかしながら、港湾内ではスペースの確保が困難な場合が多く、省スペース化やコストダウンを求められる。係船岸として利用される部分や港湾奥のこれらの海域では比較的波浪が小さい場合が多い。そこで、こ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ここでは提案する。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法を用いた数値解析、ならびに水理模型実験で行った。図-9にその状況の写真と解析にベクトル図を示す。(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-10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。 $X=200$ の波形を見ると、 $t=100\text{ s}$ にスリットからの反射波が重なり波形を変化させ、沖側へ向かっていることが分かる。



(a) 数値解析



(b) 模型実験

図-9 タイプ(d)L型スリット付きブロック堤の検討状況

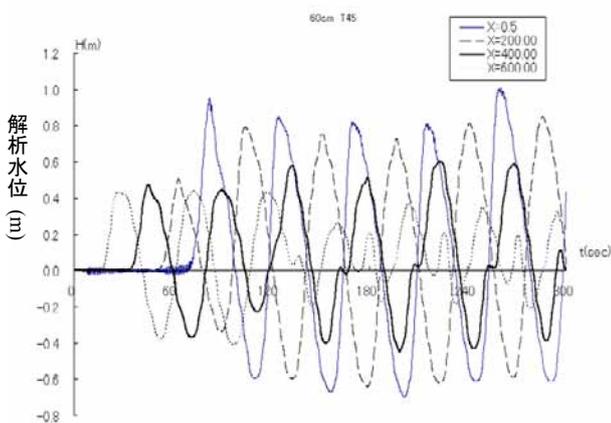


図-10 タイプ(d)の解析波形(T=45s, 礫径 60cm)

図-11 は合田ら(1976)による入反射波分離計算結果である。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, 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。他の形態との比較は後で説明するが、透過堤など同様の結果を得ることができた。

タイプ(c)の両面スリットケーソンを用いた港内長周期波対策工については、最適スリット開口率なども含めて、すでに平石ら(2007)が性能を検討している。

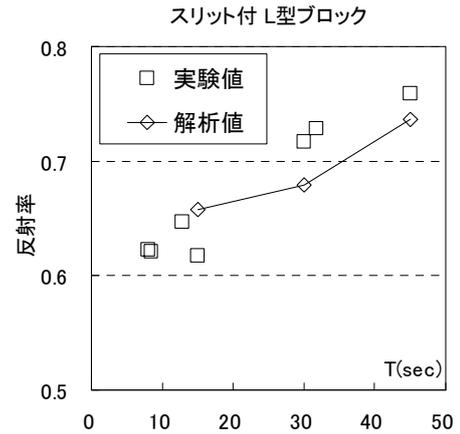


図-11 タイプ(d)の反射率の比較

(3) 形状毎の消波機能の比較

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 B と波長の比 B/L で整理して図-12(1)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、平石ら(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、透過型捨石堤、不透透型捨石堤、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。平石ら(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(渦消波タイプ)(大島ら, 2006)でも同じような評価を行っているが、ほぼ同じような結果が得られている。

図-12(2)は、解析解のみで対策工の反射率を推定するこ

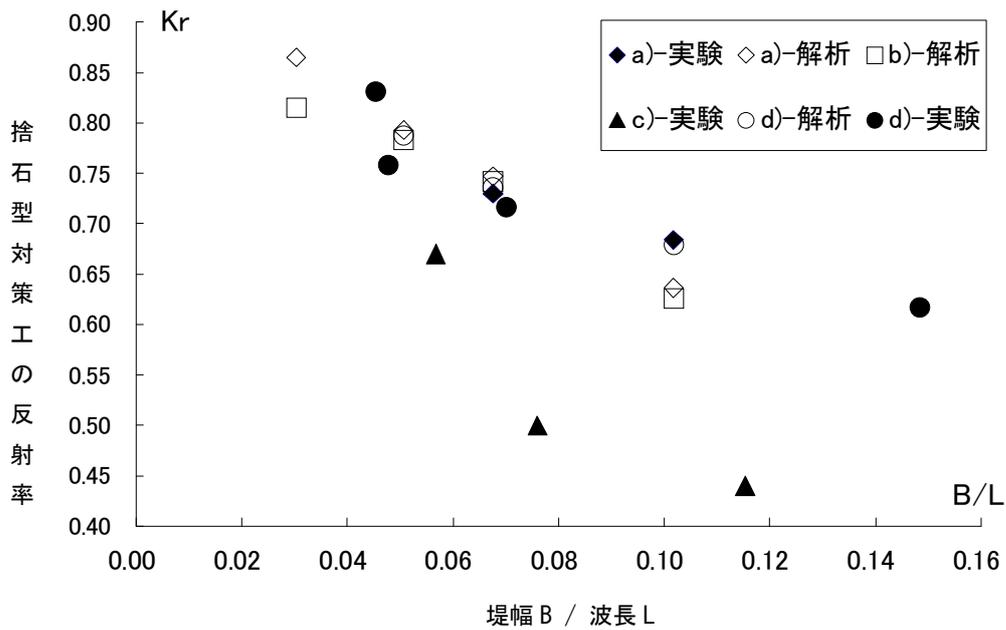


図-12(1) 捨石型長周期波対策工の形状による反射率の変化

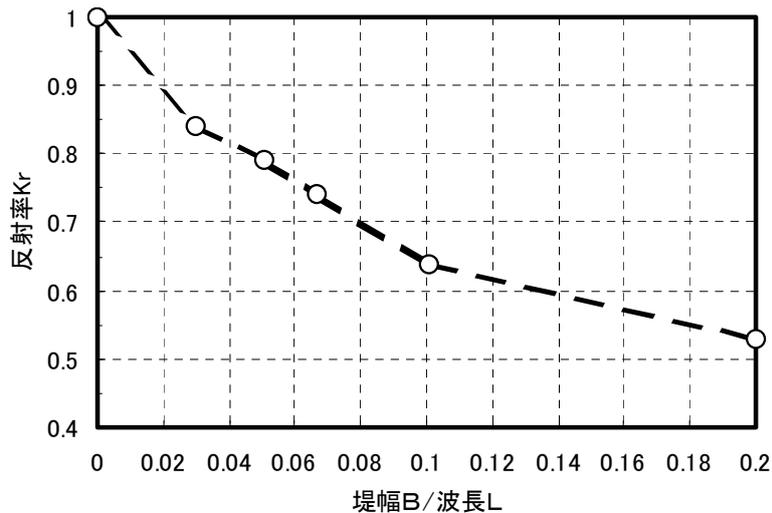


図-12(2) 捨石型長周期波対策工の反射率推定図

表-1 捨石型長周期波対策工の性能

タイプ	略称	工費	水域占有幅	付加的な利用	消波効果	既存防波堤強度検討
(a)	捨石透過型	◎	○	△	○	◎
(b)	捨石不透過型	◎	○	△	○	○
(c)	両面スリットケーソン+消波層	△	△	◎	◎	○
(d)	スリット付きL型ブロック+消波層	○	◎	○	○	○

とを想定して、設計で活用できるダイアグラムの形に図-12(1)を修正したものである。この図では、(a)、(b)および(d)タイプの反射率が、 B/L に対してほぼ同じ値を示すので、同一の B/L での値を平均して示した。(c)の両面スリットタ

イプは短周期波に対しては、スリットケーソンの効果が大きくなるので、周期15以下の風波に対しては、図-12(2)に示された値より小さく反射率は0.4~0.5程度になる。図を用いて、捨石型長周期波対策工の各タイプについて対象

とする長周期波周期 T と港内水深 h から波長を計算して ($L=T(gh)^{1/2}$), 堤幅 B に対する反射率 K_r の概略値が推定できる. ここで, g は重力加速度 (9.8m/s^2) である.

表-1 は, 捨石型の各種構造形式について, 計算結果をもとに, 適用性を評価したものである. ◎が最も優れ, ○が優れていることを示す. △は課題があり, 今後も適用性について検討すべき構造であることを示す. 工費については, 礫材を積むだけのタイプ(a)および(b)が有利である. 水域占有幅については, タイプ(c)の両面スリット型が, スリットケーソンが示す幅だけ, 他の形式より大きくなる. 逆に, 両面スリットケーソンの上部を岸壁等に活用できるので付加的な利用には優れている.

消波効果については, 長周期波に対しては, 捨石層の幅が主に関係するので, どの構造でも大きな差は生じない. ただし, 長周期波と同時に風波やうねりも作用しているので, スリットケーソンとしても機能するタイプ(c)がやや優れていると判断した. 既存防波堤強度補強については, 防波堤背後に対策工を配置する場合に, タイプ(a)は, 離岸堤のような配置となり, 礫材が直接既設防波堤の壁面に当たらないので, やや有利と考えた.

捨石堤型の長周期波対策工を製作する場合には, 材料とする礫材の粒径や空隙率についても考慮する必要がある. 平石(2004)は, 礫材の径が $40\sim 60\text{cm}$ で, できるだけ粒径がばらつかず, 空隙率を $40\sim 50\%$ に保てる必要があることを示している.

3. 渦消波型の長周期波対策工の性能

3.1 渦消波型対策工の基本形状と実験方法

図-13 に渦消波型の基本的構成を示す. 図-14 は消波メカニズムを示す. なお, 理論的な考察は, 大島ら(2007)が

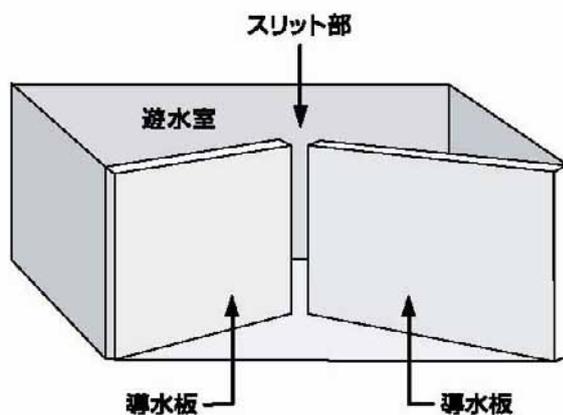


図-13 渦消波型対策工の構成

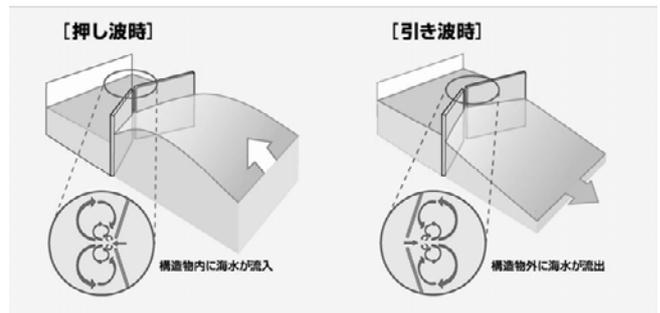
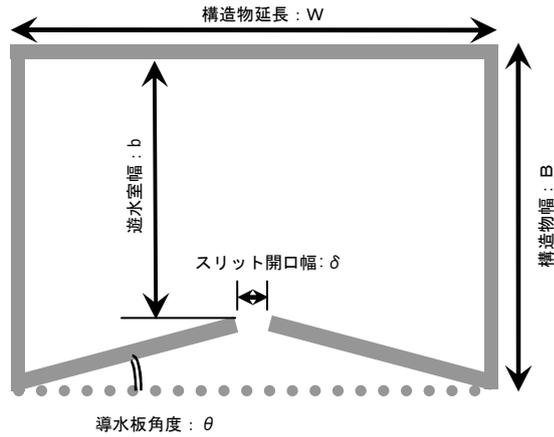


図-14 渦消波型対策工の消波メカニズム

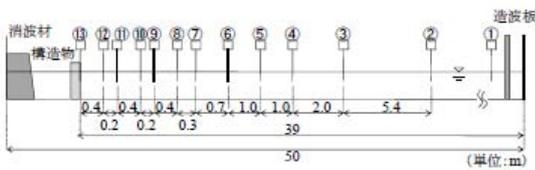
実験結果をもとに考察している. 渦消波型対策工は, 細いスリットから侵入した長周期波が, スリット背後の遊水室内で渦流れを形成し, その過程で波エネルギーが流れエネルギーに転換されることで, 前面への反射率が小さくなることを期待している. 渦消波型対策工の大きな特徴は礫材を用いないことで, 設置箇所付近で良質な礫材を確保することが困難なときでも活用できる. また, あらかじめ渦消波型のケーソン函などを製作しなくても, 現場で矢板や鋼管を打ち込むことで導水板を製作できることである.

渦消波型対策工は砂礫層を有していないので, 前述のように長周期波の消波においては捨石型対策工と比べると, 大きな堤幅を必要としない利点がある. 一方, 壁面が直立なので, 風波に関しては高い反射率を有するという欠点を有していた. しかし, 中嶋ら(2009)は, 直立消波ブロックを積んで壁面を形成することにより短周期波についても高い消波効果を有することを示している. 今後は, 建設材料のリサイクル等でコストを低減することにより, 古い護岸の改修時に長周期波対策も並行して実施する際に推奨できる.

図-15 は, 渦消波型ユニットの平面と反射率測定の水路実験断面を示す. 渦消波型対策工の消波性能は, 構造物の幅 B , 遊水室幅 δ , 遊水室幅 b 等によって決められる. そこで, 模型実験によって, それらの値による反射率の変化を模型実験で調べ, 最適な形状を考察した. 実験では長さ 50m の水路中にアクリル製の渦消波型模型と複数の容量式波高計を設置し, 規則波を入力して波形解析を行った. 反射率の計算は, 合田ら(1976)に従った. 表-2 に実験条件を示す.



(a) 基本形の諸元



(b) 模型実験の模型と波高計の配置

図-15 渦消波型の反射率測定

表-2 渦消波型の実験条件 (縮尺 1/50, 規則波)

水深 h (m)	構造条件			
	構造物幅 B (m)	スリット開口幅 δ (m)	導水板角度 θ°	構造物長さ L_B (m)
10	25	0.25~2.0	10~40	30

波条件	
波周期 T (s)	波高 H (m)
5, 10, 30, 60, 90	0.5

3.2 渦消波型対策工の反射率

表-2 に示した渦消波型の構造条件に対して反射率の変化を調べ、最適な構造を提案する。

①遊水室幅

図-16 に遊水室幅 b と反射率の関係を示す。遊水室幅 b は構造物の全幅 B と導水板の厚み、取り付け角度や形状によって決まり、できるだけ広い方が効果的である。

②構造物延長

構造物延長 W とユニットの数で、対策工の全延長が決まる。一般的にユニットが多いと製作費も大きくなるので、延長 W の決定は慎重に行わなければならない。図-17 は構造物延長 W と遊水室幅および導流堤角度で決まる遊水室

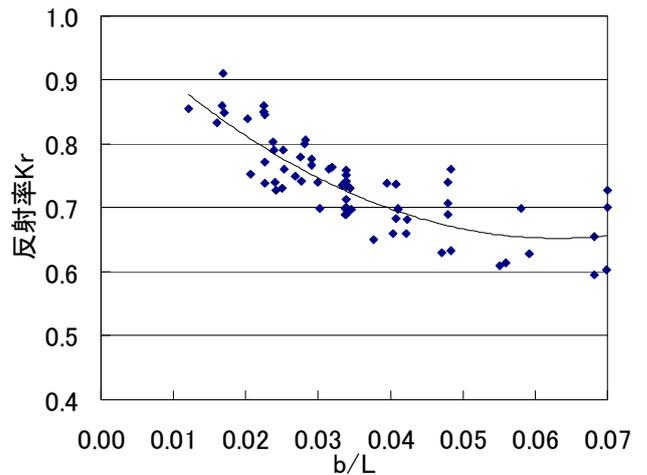


図-16 遊水室幅 b と波長 L の比に対する反射率の変化

面積 A による反射率の変化を示した図である。構造物延長 W が狭すぎると導水板前後に水位差が生じなくなるため、消波性能は低下する。ただし、次に述べるように導水板角度に最適値があるので、導水板角度が小さく、延長 W が大きすぎる場合でも消波効果は低下する。

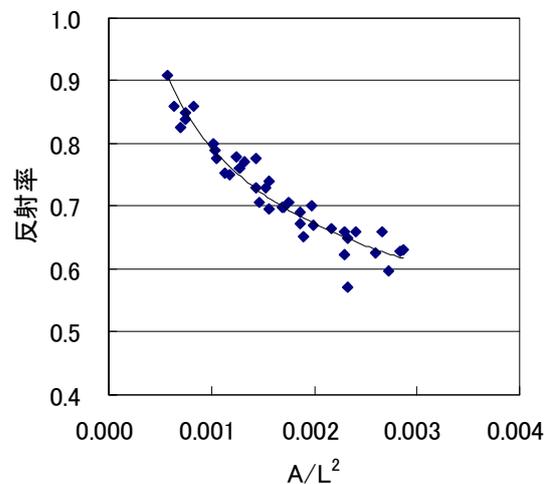


図-17 遊水室面積 A による反射率の変化

③スリット開口幅

スリット開口幅 δ による反射率の変化を図-18 に示す。スリット開口幅は周期 90s に対して 0.50m、周期 30, 60s に対して 0.75~1.0m が最適になる。ただし、スリット開口幅が小さすぎると水の粘性が大きく作用して流れが阻害されること、現地での貝等の付着により狭くなる可能性があることなども考慮して、幅広い周期帯で効果が期待できる開口幅 0.75m を推奨する。

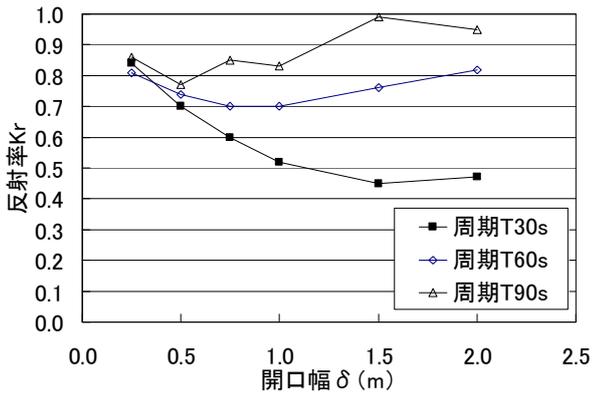


図-18 スリット開口幅と反射率の関係 (導水板角度 15 度)

④導水板角度

導水板角度 δ は、遊水面積や製作材料の量にも影響を与えるので重要なパラメータである。図-19 に導水板角度 θ° と反射率の関係を示す。長周期波に対しては、 $\theta=15$ 度のときに最も反射率が小さくなり、渦形成には 15 度が適していることが判る。

本節に示した結果を用いると、目標反射率を決めて、最適なスリット開口幅、導水板角度、構造物延長が決定でき、現場での設計が可能となる。

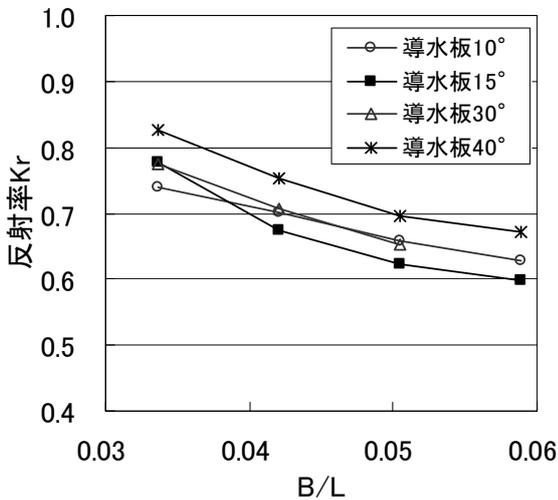


図-19 導水板角度と反射率の関係

4. 長周期波対策工の現地適用性試験

4.1 現地試験の概要

公共岸壁を対象とした場合、岸壁固定ウインチ等は間隔が固定されるため、利用する船舶が多種にわたるときは、泊地の長周期波の波高を低減し静穏度を向上させることが可能な防波堤の延伸や港内への長周期波対策施設の設置が

対策として有効である。ただし、防波堤の延伸は整備期間が長くなるため、即時的な静穏度の向上を目指すには、港内への長周期波対策施設の設置が有効であると考えられる。以上の背景を踏まえ、秋田港では、将来的な沖防波堤の延伸計画も考慮した上で、港内に傾斜堤タイプの長周期波対策施設を設置し、即時的な静穏度の向上を目指している。

本章では、沖防波堤の内側に沿って設置された長周期波対策施設の前で水位と流速等の現地観測を実施し、現地での長周期波に対する傾斜堤タイプの長周期波対策施設の反射率を調べた。

(1) 対策工の整備状況 (小澤ら, 2009)

現在(2008), 秋田港では防波堤(第一南)波除堤区間および外港地区コンテナヤード前面護岸において、傾斜堤タイプの長周期波対策施設の整備が進められている。図-20 に 2008 年度の波浪観測時点での長周期波対策施設の整備状況を示す。沖防波堤港内側の防波堤波除堤区間において、港口側 130m, 港奥側 50m が整備済みの状況である。

写真-1 は、前章で示した捨て石型透過堤タイプの対策工の外観で、暫定的に水面上の幅 B を 10m としている。現地観測や動揺ヒアリングにより改善が見られない場合には、捨て石堤の幅を増やすか、背後の遊水区間に礫材を投入する可能性がある。写真-2 が外港地区の様子で、外港護岸にも、長周期波の反射率低下をはかるため、礫材による幅広い消波層が施工されつつある。

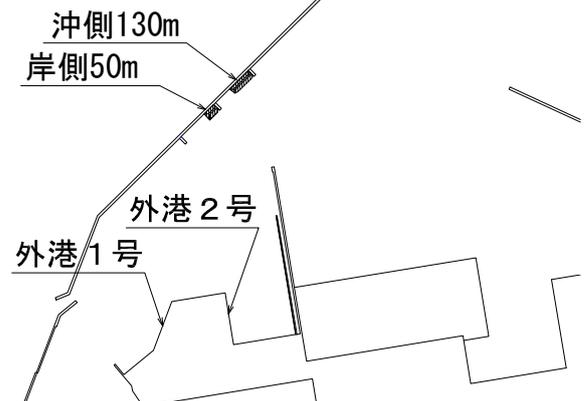


図-20 秋田港の長周期波対策施設(2008 年度)



写真-1 秋田港内の長周期波対策工(図-20の'沖側')



写真-2 秋田港内の外港地区の様子

(2) 観測期間と位置

2008年2月7日～3月11日(34日間)に港口(St.0)および図-21 および図-22 に示す港口側の対策施設(St.1～St.4)において水位、水圧、水平2成分流速の観測を実施した。

観測期間における観測データを1時間単位で、全成分および長周期波成分の統計処理を行った。St.0における全成分、長周期波成分の有義波高の時刻歴図を図-4に示す。ここで、長周期波の周期帯は「港内長周期波影響評価マニュアル」(沿岸技術センター, 2004, 以下, マニュアル)に従い30～300sとした。

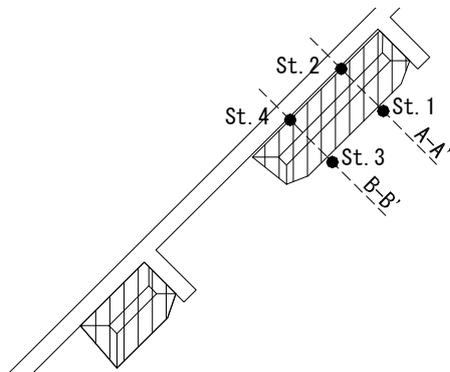


図-21 波浪観測位置

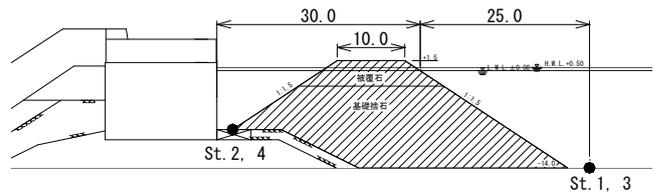
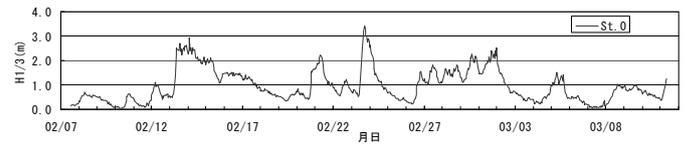
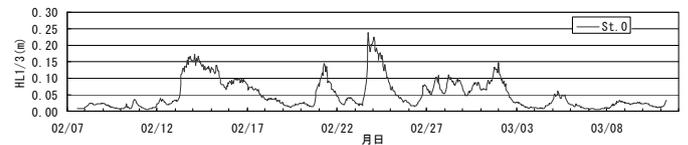


図-22 対策工の断面と観測位置



(a) 全周期帯成分



(b) 長周期波成分(30～300s)

図-23 港口部における沖合観測波高

表-3 高波発生期間の抽出

イベント No.	観測時刻
No.1	2008/02/14 02～03 時
No.2	2008/02/21 07～08 時
No.3	2008/02/23 17～18 時
No.4	2008/03/02 00～01 時

観測期間中、St.0における有義波高($H_{1/3}$)が2m以上となった表-3に示す4期間を高波イベントとして抽出した。

4.2 ブシネスク型波浪変形計算法を用いた反射率の推定

(1) 反射率の推定法

長周期波対策施設の反射率について、以下の方法により推定した。

- ① ブシネスク方程式を用いた水路モデルの波浪場解析(NOWT-PARIモデル)(平山, 2002)により、長周期波対策施設の性能を表すパラメータであるエネルギー吸収係数と反射率の関係を求める。
- ② ブシネスク方程式を用いた平面モデルによる港内長周期波浪場の再現計算結果と現地観測結果との比較により、現地観測結果を最もよく再現する吸収係数を推定する。
- ③ 水路モデルで求めた吸収係数と反射率の関係から長周期波対策施設の反射率を求める。

(2) 吸収係数と反射率の関係

NOWT-PARI モデルを用いたエネルギー吸収層と反射率の関係を求める手法は、平石ら(2007)が、すでに現地港湾をモデル化した港湾での数値解析で示しており、ここでは結果のみを示す。図-24 に長さ 5000m の仮想水路における水路端のエネルギー吸収係数と計算波形から得られた反射率の関係を示す。

現地波浪観測の結果得られた長周期波の周期は 60~90s 程度と考えられ、ここで検討したエネルギー吸収係数 0.0~3.0 の範囲は、周期 60s に対しては反射率 0.74 程度以上、80s に対しては反射率 0.80 程度以上に対応していることを示している。

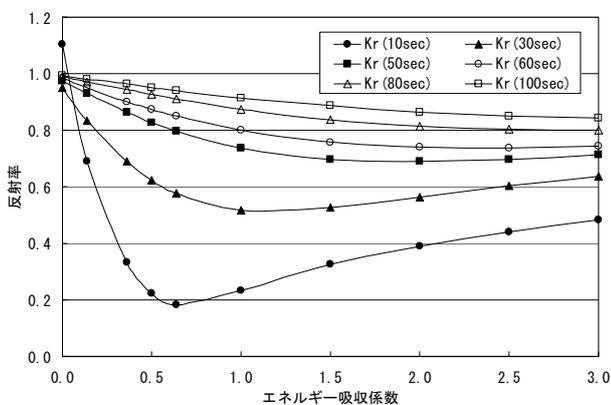


図-24 エネルギー吸収係数と反射率の関係

(3) 平面での波浪変形計算ケース

長周期波対策施設の設置位置にエネルギー吸収係数を設定して、ブシネスク方程式を用いた秋田港の平面波浪場解析を実施し、観測波高との整合性より反射率の推定を行った。検討条件は、観測期間中で最も高波浪であったイベント No.3 (2008/02/23 17~18 時) の条件とした。計算条件を表-4 に、図-25 に計算領域図を示す。

計算領域は、長周期波対策施設の法線が計算領域に対し水平となるように地形を回転させて作成した。また、格子間隔は水路モデルと同様の 10m とした。入射波高は St.0 における観測波高と計算波高の整合により設定することとし、沖側境界における入射波高の試行計算により調整を行った。

表-4 秋田港長周期波変形計算における条件

項目	係数
計算格子間隔	10m
入射波高	0.183m (試行計算の結果)
入射波スペクトル	30~300s (矩形スペクトル)
入射波向	N267° E/単一方向波 (イベント No.3 の St.0 の波向)

成分波数	256 波
計算時間間隔 Δt	0.25s
緩造波時間	300s
サンプリング時間	3600~7200s

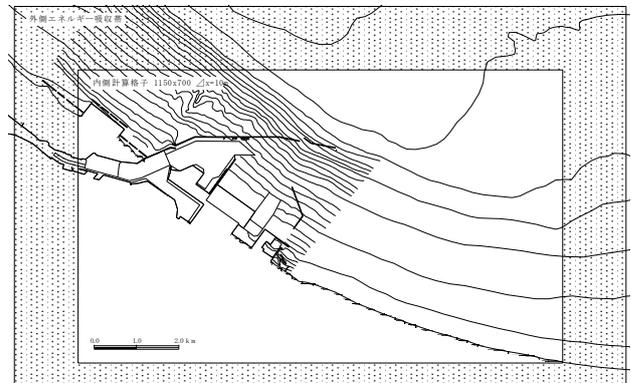


図-25 NOWT-PARI で用いる現地港湾の地形

入射波の周波数スペクトルは、30~300s で矩形となる不規則波とし、波向は観測期間における St.0 の風波の波向と同一の単一方向として与えた。

計算ケースは表-5 に示す 6 ケースとし、周期 80s に対する長周期波対策施設の反射率は 0.83~1.0 である。表-5 の吸収係数は長周期波対策施設の中央での設定値である。

表-5 エネルギー吸収係数と反射率の関係(T=80s)

Case.	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5	Case.6
吸収係数	1.60	1.00	0.64	0.36	0.14	0.00
反射率	0.83	0.87	0.91	0.94	0.97	1.00

(4) 現地反射率の推定

波の多方向性や不規則性によって生じるばらつきが存在等を考慮し、St.1~4 における観測波高と計算波高の平均値による平滑化処理を行い計算値の補正を行った。観測値から計算値(補正後)を差し引き、観測値で無次元化し、誤差最小になる反射率から長周期波対策施設の反射率を推定した。図-26 にイベント No.3 の場合の設定反射率に対する波高の誤差を示す。St.1 と St.2 では反射率 0.94 で、St.3 と St.4 では 0.87 で極小値となる。また St.1~4 の誤差の相加平均では 0.94 が極小値となった。

他のイベントにおいても同様に整理した結果を図-27 に示す。ただし、平面波浪場の計算はイベント No.3 を対象に行っているため、各 St と港口との波高比は、イベント No.3 を対象にした計算結果を用いている。各設定反射率に対する

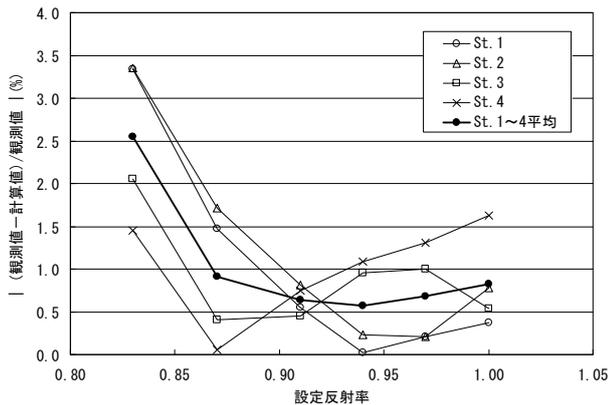


図-26 観測波高と計算波高の差と設定反射率の関係

るイベント No.1~4 の誤差およびその相加平均値、標準偏差について整理した。この結果より、対象としたイベントによりばらつきはあるものの誤差が最小となる範囲から、長周期波対策工の反射率は0.91~0.97の間であるといえる。

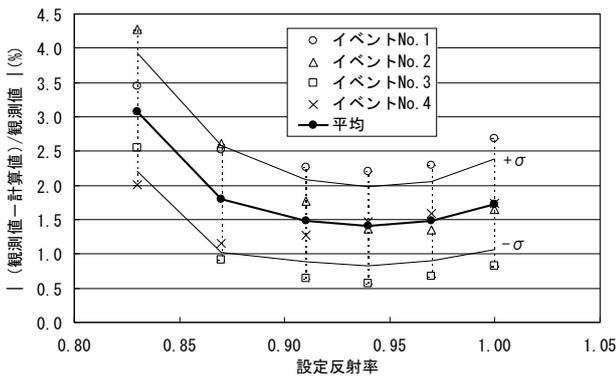


図-27 各高波イベントにおける観測値と計算値の比較

(5) 推定値との比較

現地において捨石型対策工を設置する場合には、まず目標とする反射率を求める必要がある。秋田港の観測値から求めた長周期波周期は代表値で、 $T=80s$ であった。捨石型対策工の水面での堤幅は10mであり、前述の図-12でのタイプ(a)の反射率を読み取ると、 K_r は約0.90~0.95になった。この値は、現地観測値から間接的に推定された反射率0.94とほぼ一致しており、ダイアグラム(図-12(2))を用いて各タイプの反射率を設定する手法は妥当であると言える。なお、秋田港での反射率は、目標値0.7~0.8に比較すると高くなっており、これは対象とする長周期波周期が長いためである。秋田港の現地対策施設は施工中であり、本解析結果や施工状況を検討しながら、追加の捨石投入なども検討される予定である。本試験は、反射率推定手法の妥当性を現地試験で検証することが目的であり、秋田港全

体の長周期波に対する静穏度を検討するためには、観測点が多分とは言えない。

現地においては、引き続き、長周期波対策工の施工が続けられている。計画されている対策工がすべて施工された後に、再度、港内の長周期波に対する静穏度を精査し、必要に応じて対策工の堤体幅の変更などを検討される。

5. 結論

本研究では、港内における長周期波の反射を抑制することによって、荷役障害を軽減する長周期波対策工の効果を検査した。さらに、現地港湾で試験施工された対策工の反射率を観測し、現地での適用性を調べた。得られた主な結論を示す。

- ①礫材を消波材として利用することで、様々な海域へ適用できる形態を示した。港湾計画の中では、利用可能な水域が限られるので、その状況に応じた施設を建設できる。
- ②スリット付きL型ブロック構造物の背後に礫材を投入する構造で、2重スリットケーソンや幅広捨て石堤を利用した場合と同程度の反射波低減効果が得られる。
- ③捨て石型対策工について、長周期波の周期と堤幅から反射率を簡単に推定できるダイアグラムを提案した。
- ④渦型消波タイプを提案し、長周期波反射率を低下できる最適なスリット幅や導流板角度などを提案した。
- ⑤現地観測を実施し、現地の長周期波対策工の反射率を推定した。その結果、長周期波対策施設の反射率は0.91~0.97の間であるという結論を得た。実験結果と比較すると、推定された反射率はほぼ対応する結果となった。

本研究は、著者らが、ほぼ節毎に対応する内容を各地の学会会議やシンポジウムで発表してきたものを取りまとめるとともに、記述が不十分な点を追記したものである。1冊の資料に整理することによって、現場の技術者が長周期波対策工を計画する際に、短時間で参考値を取得できることを期待している。2009年度に、港内の長周期波対策工の設置が始まっている港湾が苫小牧港と常陸那珂港で、形式は捨て石型タイプ(b)である。さらに、計画が進められている港湾として高知港、石巻港があり、引き続き、より低コストで、効果の高い構造を提案できるように研究を続けていく予定である。

最後に、MARS法を用いた数値解析の実施にあたっては、(株)高環境エンジニアリング永瀬恭一および押村嘉人氏にご援助頂いたことを記し、感謝いたします。(株)五洋建設関本恒浩および大島香織氏には渦型消波タイプに関する模

型実験を担当して頂いたことを感謝いたします。著者の一人である森屋陽一氏は、秋田港湾空港事務所から秋田港内の現地観測結果の解析を委託された(財)沿岸技術研究センターの担当として、港内反射率の計算法を検討し、本資料の作成に大きく貢献して頂いた。

(2009.9.30 受付)

参考文献

- 渥美洋一・若山義樹・國田淳・関口信一郎・川口勉・平石哲也・青木伸一・上田茂(1997)：長周期波の港内進入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討，海岸工学論文集，第44巻，pp.221-225.
- 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.
- 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，第21巻，pp.791-796.
- 大島香織・森屋陽一・水流正人・杉田繁樹・平石哲也(2006)：渦による消波効果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.
- 大島香織・森屋陽一・大塚淳一・渡辺靖憲(2007)：導水板構造物の長周期波エネルギーの低減機構について，海岸工学論文集，第54巻，pp.796-800.
- 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.
- 小澤敬二・森屋陽一・山本禎寿・平山克也・平石哲也(2009)：秋田港における港内長周期波対策施設による静穏度向上効果，海洋開発論文集，Vol.25，pp.653-658.
- 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.
- 中嶋さやか・大島香織・安野浩一朗・水流正人・杉田繁樹・西畑剛・関本恒浩・平石哲也(2009)：長周期波対策構造物の高度化に関する研究，海岸工学論文集，第56巻，印刷中.
- 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.
- 永瀬恭一・平石哲也・押村嘉人(2008)：港湾内での利用形態に合わせた長周期波浪対策技術，海岸工学論文集，第55巻，pp.811-815.
- 平石哲也・田所篤博・藤咲秀可(1996)：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第35巻3号，pp.1-36，1996.
- 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.
- 平石哲也・平山克也・南靖彦(2007)：現地港湾の長周期波対策における透過堤の適用性，港空研報告，Vol.46，No.3，pp.3-19.
- 平山克也(2002)：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港空研資料，No.1360，162p.
- 米山治男・佐藤平和・白石悟(2003)：係留索による長周期波低減システムの開発—模型実験および試設計—，港空研資料，No.1056，29p.
- 米山治男・川守田正路・朝倉邦友・増門孝一・根木貴史・大竹祐一郎(2008)：長周期動揺低減システムの開発および大型船を使用した現地実証実験，土木学会第63回年次学術講演会講演集，pp.389-390.

主要記号表

A	：渦消波型対策工の遊水室面積(m^2)
B	：対策工の消波層の幅(水面)(m)
b	：渦消波型対策工の遊水室幅(m)
D	：堤体の設置水深(m)
K_r	：波の反射率
K_t	：波の透過率
L	：長周期波の波長(m)
T	：波の周期(m)
t	：時間(s)
W	：渦消波型対策工のユニット延長(m)
X	：のり先を基準とした波高計までの距離(m)
δ	：渦消波型対策工のスリット開口幅(m)
θ	：渦消波型対策工の導水板角度(度)

港湾空港技術研究所資料 No. 1205

2009. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。