

長周期波の反射低減に関する一考察

Consideration on Reduction of Long Period Wave Reflection

富田孝史*・平石哲也*

Takashi Tomita, Tetsuya Hiraishi

Physical model tests and numerical simulations are carried out to obtain characteristics of reflection of long period waves. The results of the physical and numerical tests demonstrate that wave-absorbing materials with enough width can be reduced reflection coefficient for the long period waves in a narrow channel. Especially, the wave-absorbing material has a good effect on reduction of large waves. In harbors where small long period waves are observed, a beach and tidal flat may be applied as practical countermeasures against the long period waves.

Keywords: long period wave, wave reflection, physical model test, and numerical simulation

1. はじめに

港内が比較的静穏な状況であるにも係らず港湾内に係留された大型船舶が動揺するという問題への対策が必要となっている。係留船舶の動揺周期から判断すると、その動揺を誘発する強制力は周期数十秒から数分程度の長周期波であり、外力である長周期波と船舶係留システムの共振現象により係留船舶の大きな動揺が生じている。平石ら（1996）によって行われた現地データの解析結果によると、係留船舶のサージ動揺の振幅は長周期波の波高の 7～8 倍にも達するという。この係留船舶動揺を低減させるためには、係留システムの固有振動周期をアクティブに変化させることも考えられるが、長周期波を低減させることも対策として考えられる。本研究では、後者の長周期波の低減による係留船舶動揺の軽減対策に着目する。長周期波を低減させるためには、1) 防波堤の適切な配置により、港内へ進入する長周期波を遮断することが検討されている（平石ら、1996）。その他に、多くの港湾内では長周期波は多重反射している場合が多いため、2) 港内における長周期波の反射を低減して重複長周期波を低くすることや、3) 港湾内で局所的に反射率を低減させることにより多重反射している長周期波の空間的分布を変化させることも有効であると考えられる。

低反射防波堤等に関する従来の研究成果により短周期波の反射特性は明らかにされている。それに基づく本研究で対象とするような波長の長い長周期波の反射率を低減させることは難しいと一般にいられている。例えば、スリットケーソン堤などの場合では波長の長い長周期波の反射率を落とすためには遊水室の幅を非常に長くすることが必要であり、消波ブロック等により消波する場合でもかなり広い面積にブロックを設置しなければ有効に消波できない。しかしながら、Barthel et al. (1983) による水理実験によると、実験対象が波群に伴う長周期波である点で違いがあるが、砂と石による 1:25 勾配斜面で 0.04～0.05Hz の長周期波の反射率を 0.4～0.5 程度にまで低減することができている。さらに、前出の長周期波振幅に対する係留船舶のサージ動揺振幅の応答倍率を考えると、少しでも長周期波の波高を低減することができれば、船舶動揺量をその数倍軽減できると考えられる。そこで、本研究では港湾内で長周期波を消波することにより長周期波を低減し、係留船舶の動揺軽減への一方策を検討することを目的として、長周期波の反射特性を基礎的な水理実験と 2 次元数値計算から検討した。

2. 水理実験

(1) 実験水路

実験は運輸省港湾技術研究所の多方向不規則波造波水槽の中に、長さ 43m、幅 3.1m の水路を作成して行った。水路の末端には 1:3 勾配の碎石による消波斜面を設置した。目視によると水路内の波は水路外の波に比べてかなり安定しており、水路横方向の振動もほとんど見られなかった。

(2) 実験条件

実験水槽の長さを実港湾における周期 30 秒から 3 分程度の長周期波の波長を比較することにより、実験縮尺をフルードの相似則に従って 1/100 程度と考えて静水深を 0.2m に設定した。発生波は規則波であり、その周波数を 0.05Hz から 1.00Hz の間で 10 通り (0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.10, 0.14, 0.20, 0.33, 0.50, 及び 1.00Hz) 変化させた。これらの周波数の波は実港湾モデルでは約 200 秒から 10 秒の波に対応する。波高は各々の周波数の波

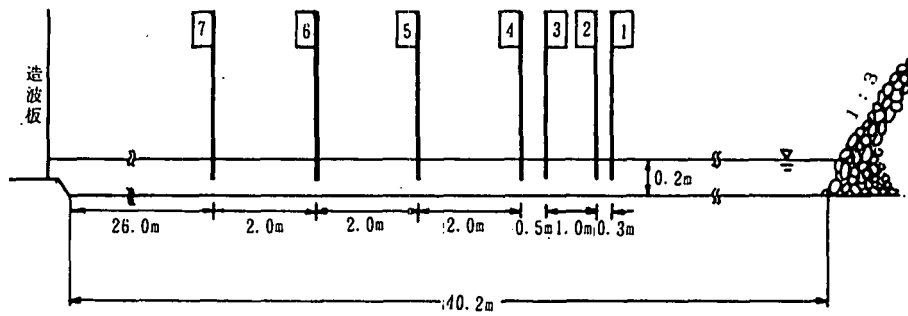


図-1 水理実験水路の概要

に対して 2~4 種類変化させた。ただし、実港湾内における長周期波の波高は数十 cm のオーダーであり、これを実験水槽内で発生させることが不可能であるため、水槽内で発生させた長周期波の波高は実際に港湾で起こりうる波高よりもかなり大きな波となっている。

(3) 実験方法

造波装置により発生した波は、水路内を進行し消波斜面において波のエネルギーを一部失うが水路端部壁により反射され造波装置に向けて水路内を戻る。この反射波は造波板により再度反射され、造波開始後しばらくすると水路内は多重反射の状態になる。例えば、水深 0.2m の本実験水路における長波の場合、約 1 分ほどで水路内は多重反射状態になってしまう。このため、本実験では計測を静水状態から水路内が多重反射状態になるまで行った。また、発生波の周波数帯が広いため、データの収集時間間隔を周波数 0.05~0.14Hz のケースでは 50ms、0.20 と 0.03Hz では 30ms、0.50 と 1.00Hz では 20ms のように変化させた。

波の反射特性を調べるために、消波斜面の前面に、直径約 30cm、長さ約 50cm の円筒状の繊維状消波材（マリンボール）を水路幅方向に 5 個、水路長方向に 2、5 及び 10 列並べてそれぞれの条件下で水路内の波と流速を計測した。さらに、マリンボールを設置しない状況でも同様な波条件下において実験を行った。

使用した水位計は電気容量式波高計であり、図-1 に示すような測点 1 から測点 7 の位置に設置した。また電磁流速計を測点 6 の静水面下 10cm の深さに設置した。

3. 数値シミュレーション

(1) 基礎方程式

防波堤により守られた港湾内では、短周期波は防波堤により港内へはほとんど侵入しないので、波群に拘束された長周期波は非常に小さく、自由進行波としての長周期波が支配的であると考えられる（関本ら，1990）。また、階段護岸などで長周期波を消波させるためには底面摩擦や水深不連続部において発生する渦などによるエネルギー減衰を考慮しなければならない。そこで、下に示すエネルギー減衰を考慮できる非線形長波方程式を基礎方程式とした。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h U_i}{\partial t} + \frac{\partial h U_i U_j}{\partial x_j} + g \frac{\partial h^2 / 2}{\partial x_i} = g h \theta_i - \frac{1}{2} f'' \sqrt{U_j U_j} U_i \quad (2)$$

上式はテンソル表示であり、 $h = \eta + d$ 、 η は静水面を基準にした水面変動、 d は静水位、 U_i は x_i 方向の鉛直平均流速、 θ_i は x_i 方向の海底勾配、 f'' は平均流速に対応した底面摩擦係数、 g は重力加速度、 t は時間、 x_i は平面座標である。

(2) 数値計算法

使用した数値計算法は陽的な差分法の一つである MacCormack 法 (Anderson et al., 1984) である。この数値計算法は、時間及び空間において 2 次オーダーの精度を有し、2 段階 Lax-Wendroff スキームの 1 種である。Fennema と Chaudhry (1990) によって、このスキームは 2 次元の非定常自由水面流れの問題に対して比較的簡単にプログラムでき、よい結果を得ることが報告されている。

MacCormack 法は Predictor と Corrector の 2 つのステップより構成される。Predictor ステップでは空間差分に前進差分、Corrector ステップでは後退差分を使用する。例えば、式(1)を差分化すると以下のようなものである。

Predictor :

$$h_{i,j}^p = h_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[(h U_1)_{i+1,j}^n - (h U_1)_{i,j}^n \right] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[(h U_2)_{i,j+1}^n - (h U_2)_{i,j}^n \right] \quad (3)$$

Corrector:

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} \left(h_{i,j}^n + h_{i,j}^p - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[(hU_1)_{i,j}^p - (hU_1)_{i-1,j}^p \right] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[(hU_2)_{i,j}^p - (hU_2)_{i,j-1}^p \right] \right) \quad (4)$$

ここに、 Δx 、 Δy は空間差分間隔、 Δt は時間差分間隔、変数の上付き添え字は時間ステップ番号、下付き添え字は空間ステップ番号を示している。なお、式(3)における時間ステップ p は predictor ステップを計算するための仮想の時間ステップである。

MacCormack スキームの安定性を解析的に議論できないため、次の CFL 条件から Δt を算出している。

$$\Delta t = C_n \min \left\{ \frac{\Delta x}{\max(\sqrt{gh} + |U_1|)}, \frac{\Delta y}{\max(\sqrt{gh} + |U_2|)} \right\} \quad (5)$$

ここに、 C_n はクーラン数で 0.4 とした。

計算領域内からの反射波を造波境界において再反射させることなく計算領域外へ通過させるために、造波境界では Kobayashi et al.(1989) で使用されている特性曲線法に基づいた開境界処理を施した。入射波には 3 次オーダーのクノイド波理論(磯部ら, 1978)を使用した。

4. 水理実験結果

図-2 は、実験波の一例を示したもので、周波数 0.05Hz (周期 $T=20$ s)、波高 $H_i=1.2$ cm の場合の測点 6 における水位の時間変動である。図中には水口らのグループにより提案された疑似非線形長波理論に基づく手法(久保田ら, 1989; 水口, 1991)により分離した入射波と反射波を併記してある。各々の図において最も大きく変動している実線が計測された水位変動、その次に変動している実線が入射波であり、反射波は最も小さく変動しているものである。後述するが、水口らによる入・反射分離手法は妥当な結果を示していることが数値計算における検討より明らかとなっている。また、微小振幅波理論に基づいて測点 6 において水路端部壁からの反射波および造波板からの再反射波等が混入し始める時刻を計算する。第 1 回目の反射波は第 1 入射波が到達してから 21 秒後(図中のケースでは約 1 波後)、再反射波(入射波と同じ進行方向)は 62 秒後(約 3 波後)、第 2 回目の反射波は 83 秒後(約 4 波後)に測点 6 に到達する。この結果をもとに図-2 を見ると、入射波成分は入射波の第 1 波目から 3 つ後の入射波で波高が増大している。反射波成分は計測波の 2 波目から検出され、第 4 波目の反射波の波高が若干増大している。これらことから、疑似非線形長波理論に基づく入・反射波分離法の適用性があると判断される。

図-3 は、本実験において入・反射波分離解析をおこなった全てのケースの反射率 ref を、横軸に微小振幅波に基づく計算波長 L に対するマリンボールの占める幅 λ の比をとり、パラメータに入射波高と水深の比 H_i/h をとって整理したものである。なお、周波数が 0.1Hz、0.14Hz、0.2Hz で波高が 5cm 以上の波では非線形性が強くて 2 倍や 3 倍周波数成分が卓越して計測されたので、これらのケースについては反射率の算定を行わなかった。無次元消波材幅 λ/L の大きな値に対するデータが少ないため正確なことは分らないが、実験の範囲にお

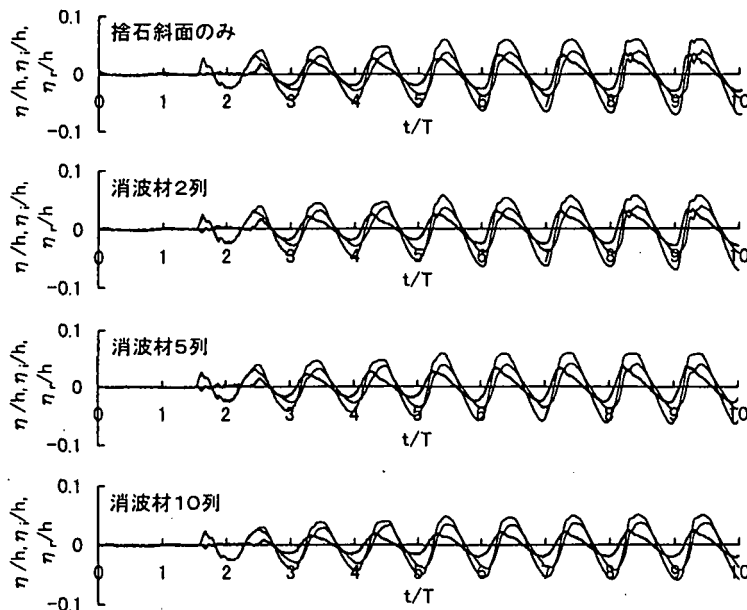


図-2 実験波形の一例(周期 20s, 波高 1.2cm, 水深 20cm, 測点 6 で計測)

いて λ/L の値を 0.2 以上としても消波効果はあまり改善されないようである。しかし、 λ/L が 0.2 以下の範囲においてはデータのばらつきはあるが、同程度の相対波高の波であれば λ/L の値が大きくなるほど消波効果が上昇する。なお、 $\lambda/L = 0$ において反射率が 1 よりも大きく下回っているのは、消波材に続いて設置されている消波斜面の影響によるものである。また、 H_i/h が大きな波ほど反射率が小さくなっている。これは、相対波高が大きな波ほど流速が速くなり、速い流速の波ほど消波材や捨石斜面内での乱れ発生により波エネルギーが消費されるため、反射波が低減された結果によるものではないかと考えられる。本研究で対象とする港湾内の長周期波は縮尺模型実験で再現できないほど波高が小さい波であるため、その反射率は、本実験における相対水深が 0.05~0.07 の反射率データよりも大きくなると予想される。これについては数値計算によって後で確認する。しかしながら、相対水深が 0.05~0.07 のデータによると消波材がない場合で反射率が 0.9 程度であったものが $\lambda/L = 0.1$ 程度にすることにより反射率を 0.6 程度まで低減させることができている。すなわち、消波材列の背後に消波斜面があるとはいえ λ/L が 0.1 程度であっても消波材の効果は認められた。

図-4 は、波の周期の影響を検討するために図-3 に示したデータを、波形勾配 H_i/L をパラメータ

にして整理し直したものである。この図から、波形勾配の大きな波ほど反射率は低くなる傾向にあるが、 $H_i/L = 3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ の波形勾配の小さな◆印であっても、消波材を $\lambda/L = 0.1$ 設置すれば消波材が無い場合に比べて反射率が 0.3 程度減少している。このことから波形勾配の非常に小さな長周期波に対しても、比較的短い消波距離により反射低減の可能性が認められた。

5. 数値計算結果

使用した数値計算は 2 次元モデルにも対応できるが、本研究では 4,000m×300m の長水路をモデルにして基礎的な検討を行った。空間差分間隔は $\Delta x = 10\text{m}$, $\Delta y = 100\text{m}$ とした。水深 d は 20m である。使用した数値計算法では未定パラメータの摩擦係数 f'' を適切に決める必要があるため、まず、 f'' による反射特性を検討した。反射率の算定は水路端部の造波境界で疑似非線形長波理論に基づく入・反射分離手法によって行った。この手法から得られる反射率と開境界処理に基づいて計算される反射率とを比較してみたところ、両者の反射率の差は 0.03 程度であった。このため、上記の入・反射波分離手法が適用できるものと判断し、以下の反射波の算定に使用した。

図-5 は、水路の造波境界から $0.9L$ までの範囲における f_1'' を 0.06 に、残りの $0.1L$ における f_2'' の値を 0.06 から 10 まで変化させたときの反射率の変化を示したものである。ここに、 L は数値計算で使用した 3 次のクノイド波理論から計算される波長である。図中のパラメータはアーセル数 $Ur (= H_i L^2/d^3)$ である。同図より、 Ur が大きな波に対するほど f'' の影響が強く現れ、 f'' の増大に伴って波は消波されて反射率が減少している。換言すれば、本研究で使用した数値計算は、波高が大きくなるほど、また波の周期が短くなるほど、摩擦係数 f'' によって大きく影響を受けるため適切にその値を定める必要がある。

図-6 は、 $f_1'' = 0.06$, $f_2'' = 2$, 水深 $d = 20\text{m}$, 入射波周期 $T = 120\text{s}$, 入射波高 $H_i = 0.3\text{m}$ の条件で計算した水位の時・空間変動を示したものである。横軸が入射波周期 T で無次元化した時間、縦軸が入射波波長 L で無次元化した造波境界からの距離である。また、縦軸における間隔 1 は η/d が 0.1 に相当する。同図より、数値分散の影響によって若干入射波は進行に伴って前傾する傾向にあるが、安定して進行している。また、造波境界 ($x/L = 0$) における重複状態にある波に着目すると、その波高は安定していることから造波境界における開境界処理が

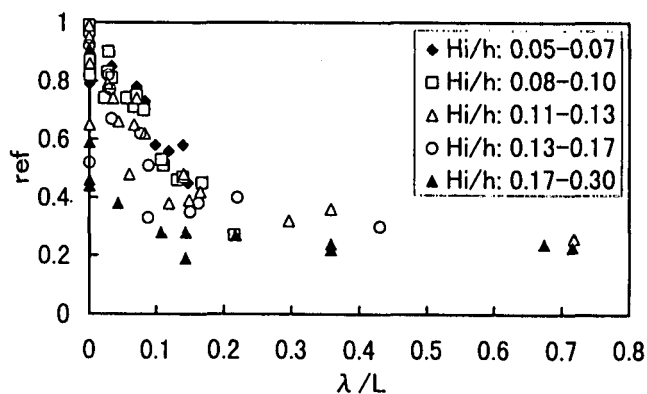


図-3 消波距離による反射率の変化
(相対波高をパラメータとして)

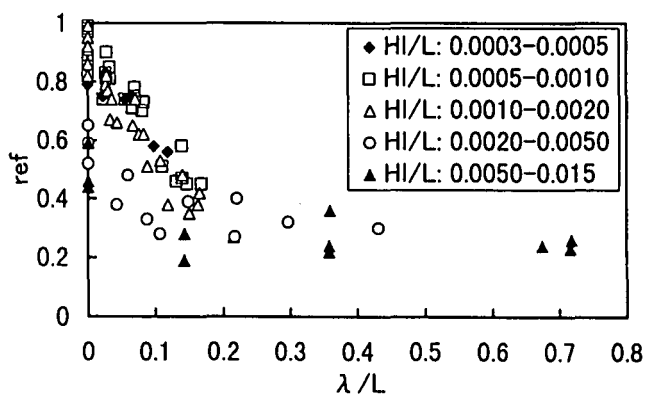


図-4 消波距離による反射率の変化
(波形勾配をパラメータとして)

うまく機能していると判断される。

つぎに、水理実験で使用したマリンボールを疑似するための f'' を検討した。水理実験ではマリンボール列の後方に捨石斜面を設置しているの、まずこれを同定しなければならない。捨石斜面に相当する f'' は、マリンボールを設置しない状況で周期 20s、波高 1cm の波（数値計算上では 200s、1m の波に相当する）を入射させたときの反射率（0.9 程度）に合うように決めると、0.5 となった。これを使用してつぎに捨石斜面前面のマリンボールに対する f'' を求めた。上記の入射波を作用させ、 $\lambda/L=0.1$ の範囲にマリンボール列を設置したときの反射率の実験値（0.6 程度）となるようにマリンボール列に相当する f'' を同定すると、 $f''=2$ となった。

このマリンボールを疑似する f'' を数値計算に使用することによって、水理実験ではできなかった波高の小さな波に対して数値実験を行った。なお、数値計算では消波距離をできるだけ小さくすることを考えて、水理実験とは異なり消波材の後ろは完全反射壁として、消波材のみでどの程度消波が可能であるのかを検討した。図-7 は、前述の数値計算で使用した水路モデルに、周期 $T=120$ s で波高 H_i を 0.1m、0.2m および 0.3m 変化させた場合の消波距離 λ による反射率の変化を示したものである。水理実験では消波材後方に捨石斜面があるために消波距離の総延長が長いことと波高が大きいため $\lambda/L=0.1$ 程度であっても反射率は 0.3 程度下がったが、数値計算結果をみると、今回対象とするような波高が小さくて周期の長い波の消波はなかなか難しいといわざるを得ない。しかしながら、

本研究で使用したマリンボールは実海域で主に短周期波の消波対策に使用されているものである。このため、模型縮尺を考慮すると実験における消波材としては非常に目の粗いものであり、それを疑似した摩擦係数 f'' の値も小さめであると考えられる。したがって、実験縮尺に応じたもう少し目の細かい消波材であれば消波材内における波エネルギーの低減が強くなり消波機能が上がることが期待できる。そしてそれを疑似する摩擦係数 f'' の値も大きくなると予想される。前出の図-5 によると、 $Ur=71$ ($T=120$ s、 $H_i=0.2$ 程度の波に相当する) の場

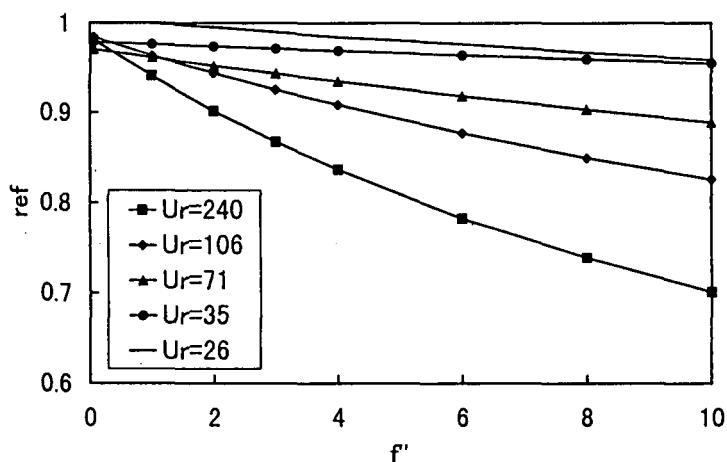


図-5 アーセル数による摩擦係数の特性

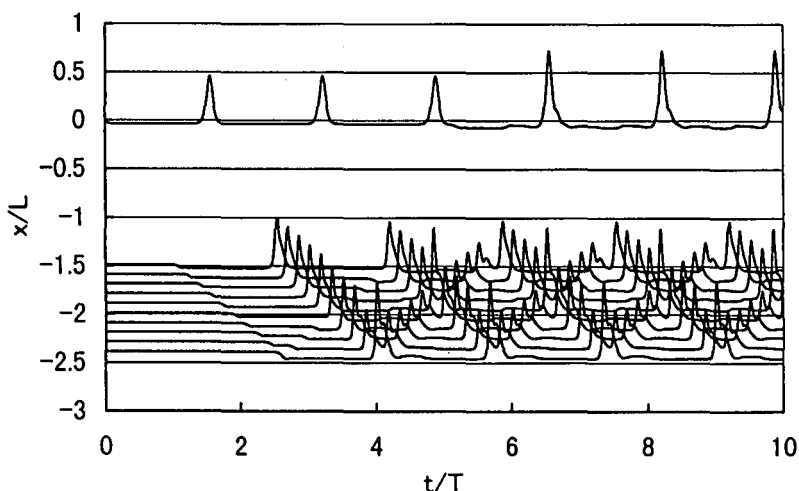


図-6 数値計算による水位の時・空間変動の一例

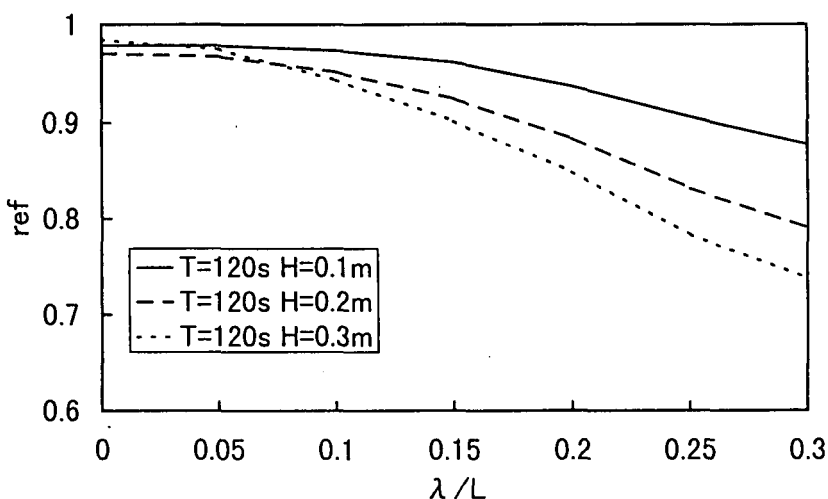


図-7 消波距離による反射特性（数値計算結果）

合、 f'' が増大するにつれて反射率 ref も若干減少する傾向にあるので、数値計算上では現場に適した f'' を与える必要がある。

また、図-7より $\lambda/L=0.3$ 程度まで大きくすれば、波高が 0.2m 程度の波であっても反射率を 0.8 程度にまで低減させることができている。この計算ケースの場合、消波距離 λ はおよそ 500m にも達する。この結果によれば、既存の港湾施設に対して消波材充填型構造物を付加することは難しいが、新たな港湾施設の拡張に伴う埋め立ての代わりに消波材やもしくは石を充填した栈橋形式護岸にすれば長周期波への低反射対策に有効であろうと考えられる。さらに、数百 m にも及ぶ消波距離を確保するためには、港湾内に自然海岸や干潟等を残したり、適当な場所に人工的にそれらを造成することも有効であると考えられる。

6. 主要な結論

本研究では、港内における長周期波の反射低減対策を目指して、長周期波の反射特性を水理実験と数値計算から検討した。主要な結論は以下のようである。

- 1) 長周期波を消波するためには、長大な消波距離が必要であり、数値計算結果に基づくと周期 120s で波高 0.2m の波に対して反射率を 0.8 程度までに低減させるためには数百 m にも及ぶ消波距離が必要である。
- 2) 水理実験で使用した消波材は実験の模型縮尺を考慮すると実際の港湾ではかなり目の粗い消波材に相当するが、消波効果が認められた。ただし、(消波材幅/長周期波の波長) の値が 0.2 以上としても消波効果の増大は認められない。この比の値が 0.2 以下の場合では、比の値が大きくなるほど消波効果の増大が認められた。
- 3) 波高が大きな波ほど消波材や捨石等による消波効果は高い。
- 4) 栈橋式護岸の下に消波材を詰める対策は実港湾における長周期波の反射低減に対して効果がある。さらに、長周期波を消波させるために自然海岸や干潟等は有効である。

謝 辞

本研究に使用した数値計算は、著者の一人が名古屋大学工学部に在職中に(財)鹿島学術振興財団の長期海外派遣研究者としてアメリカ合衆国デラウェア大学 Center for Applied Ocean Research の Kobayashi 教授の下で開発を行ったものである。ここに鹿島学術振興財団および Kobayashi 教授に深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司 (1978): 保存波の摂動解の波高による表示, 第 33 回年次講演会概要集, II, pp.760-761.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄 (1989): 現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.119-123.
- 関本恒浩・清水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.86-90.
- 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, 第 3 号, pp.3-36.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.31-35.
- Anderson, D.A., J.C. Tannehill and R.H. Pletcher (1984): Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere, 599p.
- Barthel, V., E.P.D. Mansard, S.E. Sand and F.C. Vis (1983): Group Bounded Long Waves in Physical Models, Ocean Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 261-294.
- Fennema, R. J. and M.H. Chaudhry (1990): Explicit Methods for 2-D Transient Free-Surface Flows, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 8, pp.1013-1034.
- Kobayashi, N., G.S. DeSilva and K.D. Watson (1989): Wave Transformation and Swash Oscillation on Gentle and Steep Slopes, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. C1, pp. 951-966.