

長周期波対策護岸の最適構造に関する実験

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。ここでは、両面スリットケーソンの陸側に碎石消波層を有する長周期波対策護岸を有効に活用するために、粒径の異なる碎石層を組み合わせ、最小の幅で最も消波効果の高い最適構造を数値解析と模型実験で検討した。数値解析では、消波層を構成する碎石の形状を考慮できる材料係数を導入した圧力損失式を用いた。模型実験と数値解析により、粒径の異なる碎石層を組み合わせ、長周期波の反射率は 0.7 以下にできることが判明した。

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ング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いる。その対策としては、ソフト的な対策として港内長周期波の短期予測とハード対策として沖合防波堤の最適方向への延伸が考えられる。さらに、人工干潟や適切な消波層によって港内における長周期波の反射率を低減させ、増幅を抑止することが有効である。国土交通省港湾局では、港湾の長周期波の特性と対策工の考え方を取りまとめ、2004 年 4 月に“港内長周期波影響評価マニュアル”（沿岸開発技術研究センター、2004）を発行した。マニュアルの中では、港内に消波層を設置することが勧められ、反射率を 0.5～0.7 程度にすることを目標としている。

筆者ら（平石・永瀬、2002、2003）は、港内での長周期波反射対策工として陸側にもスリットを有する両面スリットケーソンと裏込め材（碎石層）を組み合わせた“長周期波対策護岸”を提案して、その特性を数値計算と模型実験で検討してきた。その結果、特定の粒径範囲では、模型値で 1 m 幅以上の消波層を設置することにより、反射率を 0.7～0.8 にできることを示した。ただし、消波層となる裏込め材の粒径は一定であり、粒径の異なった層を混在させて、より短い幅で大きな消波効果を有する改良型護岸に対して検討していない。本研究では、異なった粒径層を組み合わせ、消波層の反射性能を調べ、最小幅で最大効果を有する構造を提案することを目的とした。

2. 透水実験による数値解析法の改良

(1) 透水試験による材料係数の設定

これまでの数値計算（平石・永瀬、2002）では、消波層内での碎石での圧力損失計算では、等質な構成体を仮

定した Ergun 式を用いてきた。しかし、この手法では、砂礫の種類や形状による損失の差が表現できず、模型実験結果との相違が生じていた。そこで、近藤ら（1983）が異形ブロックなど様々な材料を用いた消波構造物の検討に広く用いられること示している Dupuit-Forchheimer 則を適用することを試みた。Dupuit-Forchheimer 則による圧力損失は、次式で示される。

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

ここで、 α および β は、消波層内の空隙と材料から求まる係数で、次式で表される。 ρ は流体密度である。

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

$$\beta = \beta_0 \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad \dots\dots\dots (3)$$

λ は空隙率、 $q = \lambda u$ で、 u は管内流速、 μ は動粘性係数である。 α_0 および β_0 は材料係数で、透水試験で求める。

透水試験は、図-1 に示すような造水水路内に仮設した往復流発生装置で行った。往復流発生装置は、電磁流量計で計測したデータをフィードバックしてポンプの回転数を制御することによって一定流量を供給する。後述する反射率測定実験で用いる消波層構成材（工事用碎石）は、内径 25 cm、長さ 70 cm の塩化ビニル製の円筒試験容器に入れて、往復流装置の管路内に挿入した。円筒試験容器の両端は金網で覆い碎石を固定し、図-1 の P1 および P2 の位置に圧力計を設置して、2 点間の圧力を往復流内で測定した。実験対象は、3 種類に粒径を変化させた碎石で、粒径加減曲線から推定した中央粒径 (d_{50}) と、容器容積と碎石比重 ($\rho_s = 2.7$) から算出した空隙率を表-1 に示す。図-2 に電磁流量計から推定できる空隙内流速と、2 点間の圧力差から求めた動水勾配 ($I = \rho^{-1} dp/dx$) の関係を示す。流速と動水勾配は線形の関係で、式 (1) から係数 α および β を計算できる。さらに式 (2) および (3) から、材料係数 α_0 および β_0 を換算した。表-1 に透水試験から求めた材料係数の値も合わせて示す。材料の特性値である材料係数は、No. 1 と No.

* 正会員 工博 (独) 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

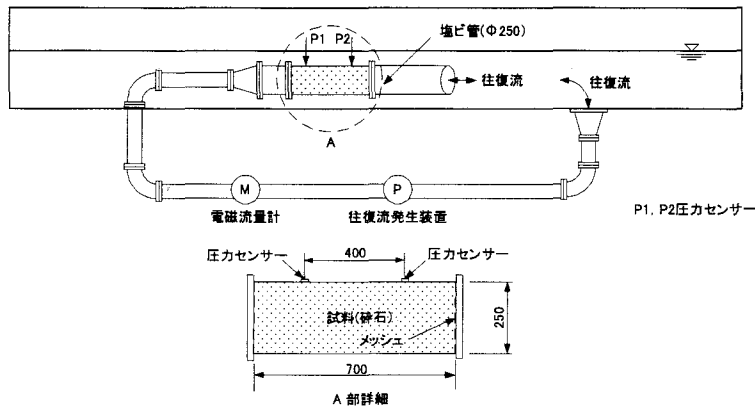


図-1 透水試験での往復流発生装置と試験体配置

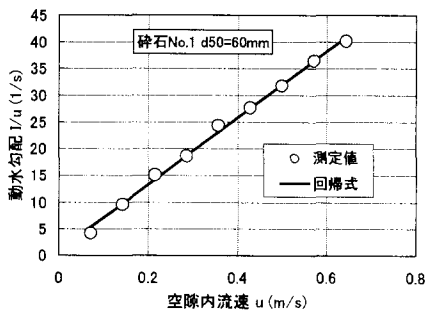


図-2 透水試験での流速と動水勾配の関係

表-1 試験砕石と材料係数

種別		No. 1	No. 2	No. 3
粒径	d_{50} (mm)	60	31	7.5
空隙率	λ (%)	57.1	49.8	43.1
α		0.88	7.91	109
β		62.38	243.6	1682
材料係数	α_0	9880	11378	4732
材料係数	β_0	2.82	3.73	1.78

2の砕石ではほぼ等しい。No.3 砕石は他の2種類に比べると、透水層内のエネルギー損失を大きくし、材料係数がやや異なる。

近藤ら (1983) は石の場合に $\alpha_0 = 800 \sim 1500$ 、 $\beta_0 = 1.8 \sim 3.6$ を提案しており、 β_0 は本実験結果と一致しているが、 α_0 は本実験結果より小さい。これは、本実験で用いた工事用の砕石は、丸みが少なく、抗力による圧力損失が自然石より大きいためと考えられる。実際の護岸工事でも機械で砕いた現場砕石を使うため、本透水試験で用いた材料係数を数値解析で用いる。

(2) 長周期波の消波層内の変形計算法

長水路内の一端に設置された両面スリットケーソンと裏込め部の消波層における長周期波の変形を解析するモ

デルは、著者ら (平石・永瀬, 2002) が提案した流体直接解析法を適用した数値波動水路である。モデルでは、数値波動水路の全長は 44 m で、水深は 51 cm である。造波境界から水深と波高に対応した孤立波と規則波を与え、時間間隔毎に各格子の流速ならびに流体占有率を計算し、格子内の水表面勾配も考慮して波形変化を求める。両面スリットケーソンは高さ 15 cm の不透過マウンドに設置し、マウンド上から水面まで同一断面で、スリットの空隙率は 50% とした。空間格子間隔は 0.5 m で断面方向の計算範囲は、スリット柱と空隙部をそれぞれ一対含む範囲に限定している。時間間隔はクーラン数が 0.1 となるように自動的に調整した。両面スリットケーソンを通過した長周期波について、消波層内で圧力損失を計算する。

流体直接解析法による圧力損失計算の検証は、まず単純な長さ 100 cm、直径 25 cm の円筒管路の中に管路両端からそれぞれ 15 cm 内側の位置に長さ 70 cm の消波層が充填されている場合を流体直接解析法でモデル化して行った。一定流速を与えた場合の消波層両端の圧力差を計算し、前節で示した透水試験結果と比較した結果が図-3 である。図中の白丸記号と実線で、管路内の流速変化に対する圧力差の実験と計算値を示す。両者はよく一致し、透水試験で求めた材料係数を用いた本数値計算モデルによって、消波層内の流体による圧力や流体の運動が精度良く計算できることがわかる。

3. 最適構造に関する模型実験

(1) 実験模型の構成

図-4 に本研究で提案する粒径の異なる消波層を組み合わせた長周期波対策護岸の模型の構成を示す。実構造物の設置水深を 10~20 m と仮定し、水槽での水深 50 cm から、その縮尺を 1/40~1/20 として模型護岸のサイズを決定した。水槽内でのケーソンの設置水深は 50 cm で、

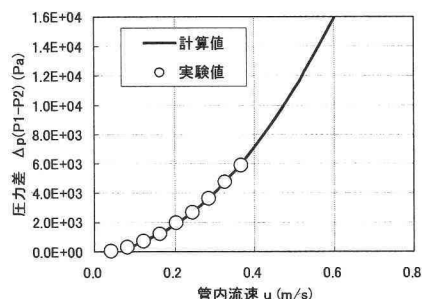


図-3 圧力損失計算値と実験値の比較

スリットの開口率は50%とし、遊水部の幅は40 cmとした。ケーソンの背面にも同様のスリットを有し、その背後に総幅100 cmの裏込め層(消波層)を設置した。消波層は4層に等分割し、ケーソンに接する層を粒径60 mmとし、順次30 mm, 10 mmと小さくしている。異なる粒径の碎石層を組み合わせるために、碎石は幅25 cm, 高さ70 cmの小型金属籠に詰め、4個の籠を組み合わせる幅100 cmの消波層を形成させた。波高計は護岸前面、遊水部、消波層内に設置した。

水路全体は、長さ52 m, 幅0.7 mで一端の造波板から孤立波と周期4~8 s(実機では26~50 s換算)の規則波を造波した。孤立波の反射率は、模型からの反射波が造波板へ戻ってくる前に造波を止め、水路内における波形変化から求めた。規則波は吸収制御機能を有する造波水路内で定常状態を2分間計測し、入射波分離推定法で反射率を求めた。4層に分割した消波層には3種類の粒径の異なる碎石を組み合わせる用いた。

図-5は各実験ケースの粒径組み合わせの模式図で消波層幅は一定である。図-5においてCase-NおよびCase-0は、同一水路で実験をした文献中(平石・永瀬, 2003)のケースに相当し、それぞれベニヤ板で消波層への流入をとめた完全反射型および様な粒径で消波層を構成した従来の護岸に相当する。消波層の粒径は、比較的反射率が小さくなった $d=30$ mmを用いた。図のCase-1~4は粒径を消波層内で変化したもので、Case-1では荒い粒径からやや細粒径へ変化させ、Case-2では実験で使用できる最も細かい粒径まで変化した。Case-3およびCase-4では、細粒径層を荒い粒径層で挟んでサンドイッチ構造としたもので、その効果を調べた。

写真-1に護岸模型全景を示す。木製の両面スリットケーソン模型背後に、4つの碎石籠が並んでおり、異なる粒径の碎石を詰めた碎石籠を組み合わせることによって、消波層全体の碎石構成を変える。

(2) 反射率の計測結果

図-6にCase-1の実験で観測した波高4 cmの孤立波

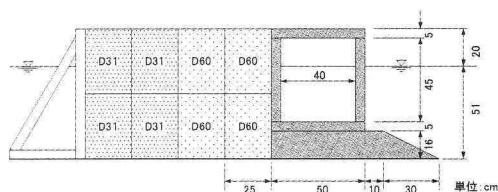


図-4 長周期波対策護岸の模型断面

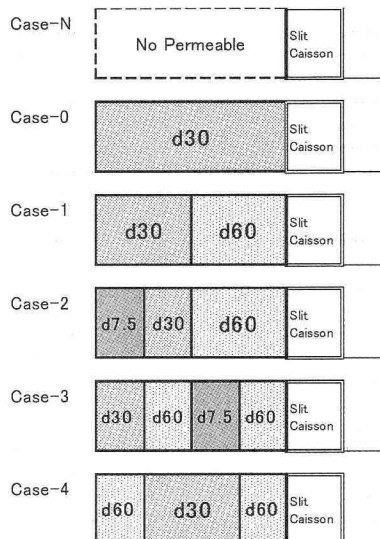


図-5 消波層内の粒径組み合わせ

の波形を示す。図では、護岸前面を0として沖合へ距離 x 離れた4測点での波形を示す。P.1は、最も沖合の測点で、造波機から発生した孤立波が観測された後に、反射波が観測でき、容易に入射波高と反射波高の比を求めることができる。P.4は、護岸により近く、入射波形と反射波形が明瞭には分離できない。P.6はスリット遊水部、P.7は消波層内の測点で、入射波と反射波が重なって水位が上昇している。P.6とP.7を比較すると、消波層内のP.7の水位ピークが低い。

図に示すように、造波中に反射波形が数回観測できるので、1波目と2波目の反射率 Kr を求めて、その平均値

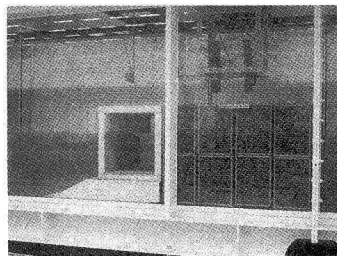


写真-1 長周期波対策護岸の実験模型

を対象ケースの反射率として整理した。表-2に、規則波のケースも含めて、実験反射率の一覧を示す。

図-7は、消波層無しおよび一様粒径の従来型と改良型の基本形における反射率を比較したものである。波高 H は4cmとした。消波層がない場合 (Case-N) に比較すると消波層を有する長周期波対策護岸の反射率が低いことが判る。一様粒径 (Case-0) と改良型 (Case-1) を比較すると、全周期帯において反射率は小さくなり、消波層内の粒径を変化させることは有効である。

図-8は、改良型について反射率を比較したもので、(1) および (2) は波高 $H=2$ および4cmに相当する。図-8から波高が異なっても反射率はほとんど変化せず、Case-3を除くと、他のケースの反射率はほぼ同じに

なることがわかる。これは、Case-3は中間に細粒径層を含んでおり、細粒径層自体が不透過層に近い性質を有しているために、有効消波層長が比較적으로短くなったためと考えられる。 $T=2$ sではCase-2、 $T=4$ sではCase-1、 T が6sより長くなるとCase-1とCase-4が最適になる。したがって、今回の実験範囲では $d=30\sim60$ mmが最適粒径となり、それらを適切に組み合わせると一様粒径より反射率を低くできる。

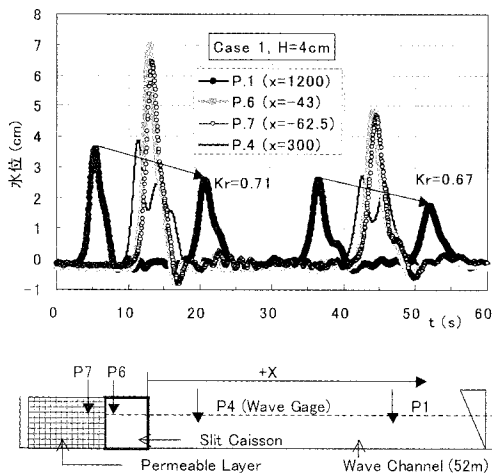


図-6 実験で観測した孤立波形

表-2 測定反射率の一覧

	$T=2$ s	$T=4$ s	$T=6$ s	$T=8$ s	Solitary
$H=2$ cm					
Case-N	0.72	0.85	0.81	0.80	0.96
Case-0	0.29	0.47	0.65		0.93
Case-1	0.20	0.44	0.60	0.67	0.68
Case-2	0.12	0.55	0.64	0.72	0.74
Case-3	0.31	0.69	0.65	0.73	0.77
Case-4	0.18	0.52	0.62	0.66	0.69
$H=4$ cm					
Case-N	0.68	0.89	0.81	0.80	0.94
Case-0	0.26	0.52	0.63		0.94
Case-1	0.17	0.49	0.58	0.67	0.69
Case-2	0.14	0.56	0.62	0.69	0.74
Case-3	0.28	0.71	0.65	0.72	0.79
Case-4	0.19	0.55	0.58	0.66	0.70

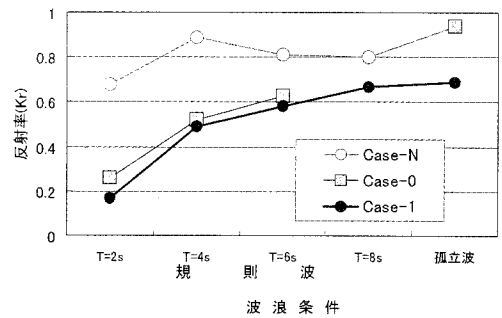
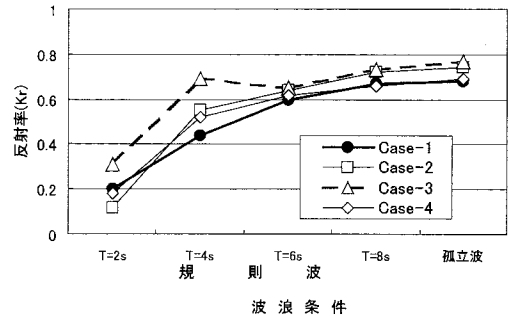
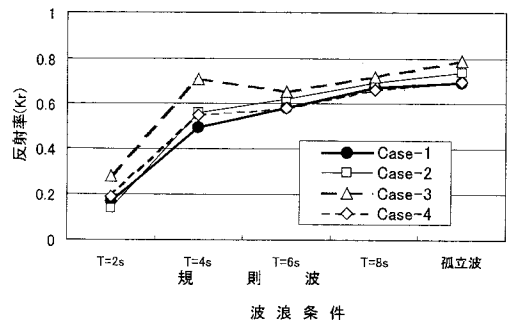


図-7 不透過および一様粒径消波層との比較



(1) 波高2cmの場合



(2) 波高4cmの場合

図-8 改良型護岸の実験反射率の比較

4. 数値計算による適用性の検討

(1) 模型実験による検証

ここでは、数値波動水路の一端に消波層を持つ長周期波対策護岸を設置した場合の長周期波反射率を計算した。反射率は、沖合の波形から設定できる入射孤立波の頂部水位と反射孤立波の頂部水位の比で定義した。

図-9に中央粒径30mmの一樣なケースと、今回実験を行ったCase-1での反射率の比較を示す。反射率 Kr の実験値と計算値は、ほぼ一致しており、透水試験で求めた材料係数を用いて圧力損失をモデル化した流体直接解析法による長周期波変形計算用の数値波動水路の妥当性を示すことができた。

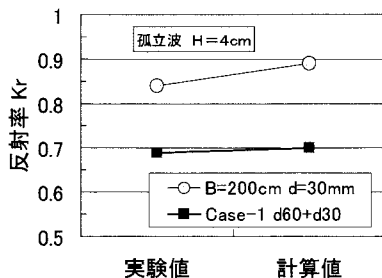


図-9 一樣および異種粒径消波層の反射率

(2) 現地への適用性評価

模型実験で検討した結果から、長周期波対策護岸の消波層では、粒径一樣の碎石で構成するよりも、荒い粒径とやや細かい粒径を組み合わせることにより反射率が低くできることが判った。ここでは現地スケールによる数値解析で、改良型消波層の適用性を確認した。模型実験では、Case-4のサンドイッチ構造とCase-1が、やや有効になったが、大きな変化は見られなかったので、Case-1およびCase-4に代表される改良型の適用性を数値解析で調べた。本模型実験は1/40縮尺と仮定すると、数値解析ではスリットケーソン前面水深が20mになる。入射条件として波高1.0mの孤立波を作用させた。材料係数は透水試験のNo.1およびNo.2碎石の平均値として $\alpha_0=10^4$ 、 $\beta_0=3.3$ を用いた。現地碎石粒径は、40cmと80cmとした。スリット直背後に80cmの碎石を設置する

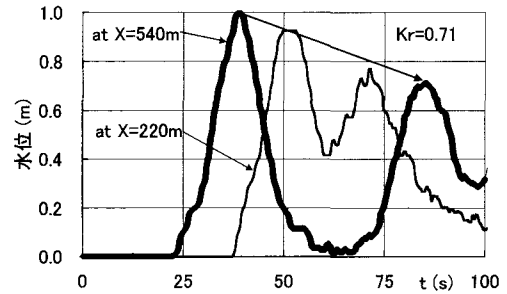


図-10 改良型護岸前面での入射波形と反射波形

とスリット空隙からの碎石落下を防ぐ効果がある。消波層長は50mとし、25mずつ $d=80$ cmと $d=40$ cm碎石を用いたケースをCase-p1、50mの中で前と後の12.5mだけ $d=80$ cmを採用し、中央部の25mを $d=40$ cmで充填したケースをCase-p2とする。

図-10は、Case-p1での計算波形を示したものである。図中の x は、護岸前面からの沖合への距離である。図から入射および反射孤立波のピーク水位の高さの比を反射率として定義すると $Kr=0.71$ である。Case-p2では $Kr=0.70$ となり、計算ではサンドイッチ構造にすると、反射率を若干小さくし、長周期波対応護岸の適用性をより高めることができる。

5. あとがき

本研究で、粒径の異なる碎石からなる消波層を有する改良型長周期波対策護岸の反射波特性を検討したところ、模型実験で粒径60mmから順次消波層内の粒径を小さくしたタイプがより適切であることが判明した。また、透水試験を実施して流体直接解析法で用いる材料係数を決定し、現地での護岸適用性を検討できる数値モデルを確立した。

参考文献

- 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. 20, 79 p.
- 近藤淑郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, 275 p.
- 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, 海工論文集, 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証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 801-805.