

長周期波対策護岸の性能検証実験

平石 哲也*・永瀬 恭一**

周期数分～十数分の長周期波によって係留大型船の水平運動が励起され、係留索の切断事故や荷役障害が生じている。対策の一つとして、港内での長周期波の増幅を低下させる長周期波対応消波護岸が提案されている。これは、陸側にも空隙壁を有する両面スリットケーソンを製作し、ケーソン背後にも、砂礫等により幅の広い消波層を設置したものである。本研究では、現地護岸の $1/20 \sim 1/40$ に相当する模型を製作し、規則波と孤立波を用いた水路での模型実験で長周期波対応護岸の反射率が検証されている。さらに、直接流体解析法による数値解析で斜め入射波に対する当該護岸の消波効果が推定されている。

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おり、その対策が緊急に必要である。ソフト的な対策として港内長周期波の短期予測、ハード対策として沖合防波堤の最適方向への延伸や波除堤の新設が提案されている。これらの対策の効果は、長周期波に対する荷役稼働率を算定することによって定量的に評価でき、すでに全国の港湾で具体的な対策工が計画されている(平石ら, 2001)。ただし、沖合防波堤の整備には多大な建設コストが必要で、早急な対応が困難である場合が多い。もう一つの対策として、港内における長周期波の増幅を抑止するために、港内での人工海浜やれき浜等の消波施設の整備による港内での長周期波増幅の低減を提案した。しかし、港湾の物流拠点としての機能を考慮すると、人工海浜や人工干潟の活用は、大型船が入出航する大規模な港湾では必ずしも適切でない場合もある。

そこで、著者ら(平石・永瀬, 2002)は、荷役に使用されている岸壁・護岸等の既存施設を改良して、港内における長周期波の増幅を低下できる長周期波対策護岸を提案した。港湾で多用されているスリットケーソンタイプの直立消波岸壁では遊水部の奥行きが数 m 程度であり、周期数秒の風波しか消波できない。提案した長周期波対策護岸は、陸側にもスリットを有する両面スリットタイプのケーソンを活用し、裏込め材に大型の雑石層を採用して、ケーソン背後にも 50 m 以上の幅の広い消波層を設けたもので、周期十数秒以上のうねりも含めて、港内の護岸や岸壁からの長周期波の反射を軽減させるものである。

両面スリットタイプのケーソンを有し、裏込め材に粒

径 20 cm 程度の雑石を用いた護岸は、すでに横須賀港で実用化されており、裏ごめ層の流出や陥没は見られない。そこで、長周期波の消波メカニズムを検討し、当該消波護岸からの反射率を推定するために、流体直接解析法(MARS; Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)を活用した数値波動水路を開発した。その結果、消波層の粒径が 10 cm のときに反射率が $0.4 \sim 0.7$ になることを示した。しかし、数値波動水路による数値実験では消波層内の抗力係数等を仮定して設定しており、現地観測等での検証が必須になる。そこで、検証調査の一環として、本研究において、長水路での模型実験を実施し、長周期波対応消波護岸を疑似した模型護岸における反射率を調べた。さらに、模型実験で検証された現地での消波性能を近似的に再現する数値計算法を活用して、斜め入射波に対する護岸の消波性能を、平面計算で検討した。

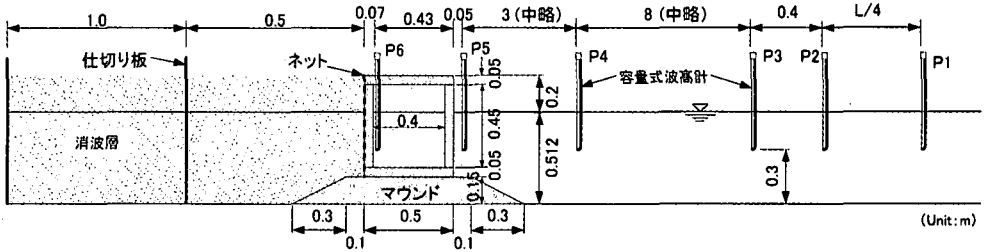
2. 模型実験の方法

(1) 消波護岸の構成

図-1 に実験で用いた長周期波対策護岸模型を示す。検討する長周期波対策護岸の諸元は以下のように決定した。まず、現地での構造物の設置水深を $10 \sim 20$ m とし、水槽での設置水深を 50 cm とする。縮尺は、 $1/40 \sim 1/20$ に相当する。両面スリットケーソンの遊水室の幅は、最大で 10 m 程度と考えられるので、模型では 40 cm とする。現地で施工できる雑石の直径は最大で 2 m 程度なので、それ以下の粒径を使用するものとして、実験での碎石の粒径を、 $40 \sim 80$ mm, $20 \sim 40$ mm および $5 \sim 15$ mm の 3 種類とした。粒径にばらつきがあるのは、石を砕く過程で一定粒径を維持するのが困難であるためで、実験開始前に、目標粒径範囲の碎石を選定して用いた。消波層の幅は、1 m (現地で $20 \sim 40$ m) および 2 m (現地で $40 \sim 80$ m) とした。スリットの開口率は、20 および 50% と変化させ、前面と背面では同じ開口率とした。また、背面スリットと消波層の間に 1 cm 格子の金属製ネットを張り、粒径の細かい碎石の流出を防いだ。さらに比較

* 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



図一 長周期波対応消波護岸の構成と計測器の配置

のために、ケーソンと消波層の間に不透透の仕切壁を挿入して片面スリットケーソン壁とした場合も調べた。

(2) 実験装置の配置

図一に、反射率解析用の容量式波高計の配置を示す。水槽の全長、幅、高さは、それぞれ 52 m、1.0 m および 1.5 m である。岸壁模型から約 43 m 離れて吸収式のピストン型造波機が設置されている。現地で観測される長周期波の代表値は、波高 50 cm、周期 60 s 程度である。縮尺を 1/20 とすると実験波高と周期は、2.5 cm と 13 s となる。波高は再現できるが、水槽長の制限で周期 13 s の波は造波できない。そこで、うねりからやや周期の短い長周期波が含まれる周期帯の波に対する適用性を検討するものとして、実験波の周期を、2 から 6 s (現地で、8.9 s、12.6 s から 26.8 s、37.9 s) とした。造波した波は、孤立波と規則波である。波高は、それぞれ 2 cm および 4 cm とした。表一に実験条件一覧および反射率の計測結果を示す。

図一の、P. 1、P. 2 および P. 3 は入・反射波分離計算に用いた波高計である。計測波の波長に応じて、最も適切な間隔を有する波高計群を抽出して解析を行った。水位データのサンプリング間隔は、0.05 s で、孤立波の場合は造波開始直後、規則波の場合は反射波が十分発達した後に 2 分間計測を行った。

(3) 反射率の解析

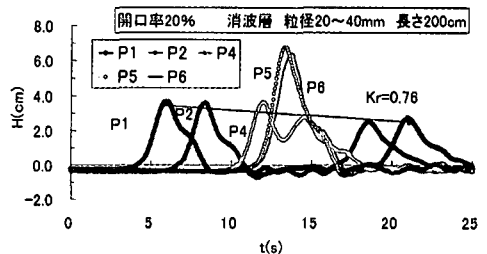
図二は、消波層長 2 m、粒径 20~40 mm、スリット開口率 20% の消波護岸に波高 4 cm の孤立波を作用させた場合の各測点での観測波形を示す。最も沖側の P. 1 における観測波形を見ると、造波開始直後に入射波としての孤立波形が現れている。入射波高は $H_i = 3.91$ cm である。ケーソン遊水室内の P. 6 では、消波層からの反射波とが重複し大きな水位上昇が見られる。反射波は、再度 $t = 22$ s 後に P. 1 で観測される。P. 1 での反射波高 H_R は 2.98 cm である。したがって沖合いの波高計での観測波高比から反射率を定義すると、 $K_R = H_R/H_i = 0.76$ になる。このように孤立波のケースでは、造波開始後沖合いの P. 1 点で明瞭に入射波形と反射波形が分離して現れたので、その波高比を測って、表一に示した反射率を求

めた。

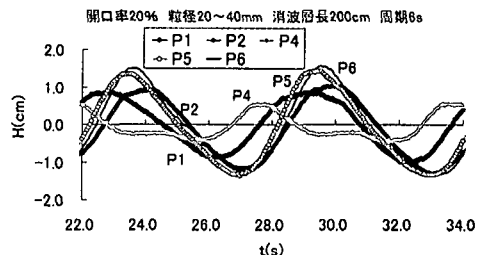
図一3 は、図二と同じ条件の消波岸壁に、周期 6 s の規則波を作用させた場合の各測点での観測波形を示す。造波信号で規則波を与えても、水槽内では水路床上、ケーソン遊水室および消波層内での変形によって規則波形は歪み不規則的な水位変動を示す。スペクトル解析を行うと、中心周波数に高いピークを持つが、ある程度の周波数帯にエネルギーの広がりが認められた。そこで、前述の入・反射波分離計算法を適用して、スペクトル解析結果からエネルギー比を算出して反射率を求めた。図一3 のケースでは、P. 1 と P. 2 の測定データから 512 個のフーリエ係数を求めて反射率を計算し、 $K_R = 0.51$ を得た。

3. 実験の結果

消波層に用いる雑石の粒径は波エネルギーの減衰に大きな影響を及ぼすため、最初に粒径による反射率の変化



図二 消波護岸を有する水路内での孤立波の波形変化



図三 消波護岸を有する水路内での規則波の波形変化

表-1 実験条件と計測反射率

波種類	周期(s)	開口率(%)	波高(cm)	消波層長(m)	粒径(mm)	計測反射率
孤立波	20	20	2	0	40~80	0.83
				100	20~40	0.68
				200	5~15	0.74
			4	0	40~80	0.4
				100	20~40	0.49
				200	5~15	0.74
		50	2	0	40~80	0.83
				100	20~40	0.62
				200	5~15	0.71
			4	0	40~80	0.43
				100	20~40	0.53
				200	5~15	0.74
	50	20	2	0	40~80	0.81
				100	20~40	0.65
				200	5~15	0.75
			4	0	40~80	0.45
				100	20~40	0.48
				200	5~15	0.72
		50	2	0	40~80	0.81
				100	20~40	0.63
				200	5~15	0.73
			4	0	40~80	0.45
				100	20~40	0.52
				200	5~15	0.73
規則波	2	20	2	0	40~80	0.35
				100	20~40	0.17
				200	5~15	0.23
			4	0	40~80	0.36
				100	20~40	0.13
				200	5~15	0.23
		50	2	0	40~80	0.23
				100	20~40	0.18
				200	5~15	0.16
			4	0	40~80	0.42
				100	20~40	0.18
				200	5~15	0.19
	4	20	2	0	40~80	0.72
				100	20~40	0.29
				200	5~15	0.54
			4	0	40~80	0.18
				100	20~40	0.27
				200	5~15	0.54
		50	2	0	40~80	0.68
				100	20~40	0.26
				200	5~15	0.52
			4	0	40~80	0.12
				100	20~40	0.27
				200	5~15	0.52
	6	20	2	0	40~80	0.77
				100	20~40	0.32
				200	5~15	0.65
			4	0	40~80	0.38
				100	20~40	0.47
				200	5~15	0.66
		50	2	0	40~80	0.74
				100	20~40	0.41
				200	5~15	0.64
			4	0	40~80	0.45
				100	20~40	0.53
				200	5~15	0.64
	50	20	2	0	40~80	0.85
				100	20~40	0.47
				200	5~15	0.76
			4	0	40~80	0.38
				100	20~40	0.49
				200	5~15	0.76
		50	2	0	40~80	0.89
				100	20~40	0.52
				200	5~15	0.79
			4	0	40~80	0.43
				100	20~40	0.58
				200	5~15	0.79
規則波	2	20	2	0	40~80	0.83
				100	20~40	0.68
				200	5~15	0.74
			4	0	40~80	0.4
				100	20~40	0.49
				200	5~15	0.74
		50	2	0	40~80	0.83
				100	20~40	0.62
				200	5~15	0.71
			4	0	40~80	0.43
				100	20~40	0.53
				200	5~15	0.74
規則波	4	20	2	0	40~80	0.81
				100	20~40	0.65
				200	5~15	0.75
			4	0	40~80	0.45
				100	20~40	0.48
				200	5~15	0.72
		50	2	0	40~80	0.81
				100	20~40	0.63
				200	5~15	0.73
			4	0	40~80	0.45
				100	20~40	0.52
				200	5~15	0.73

を調べた。図-4は消波層の中央粒径の変化による実験で計測できた反射率の変化を示す。消波層の長さは固定で200 cmである。凡例中の Soli.および Reg.は孤立波および規則波の場合を示し、 T および H は周期と波高を示す。図に示すように、本実験で対象とした粒径範囲では、孤立波と規則波の両ケースで、粒径が大きくなると反射率は低下する。その割合は、規則波の方が顕著になり、 $T=6$ s でも、粒径が60 mm のときに反射率を0.4まで低下させることができる。波高による反射率の相違は観測できず、 $H<4$ cm の範囲では波高によらずに反射率は決まる。以下の検討では、波高は4 cm で一定とした。

図-5は、波周期による反射率の相違を規則波で調べた結果である。“Single”は片面だけにスリットを有する護岸で、消波層は無い。“Double”は長さ200 cmの消波層を有する両面スリットケーソン式護岸である。スリットの空隙率は“open”で表した。 $T=2$ s では、スリット壁を有する直立消波護岸でも反射波を低減する効果を有し、open=20%およびopen=50%のときに反射率は、それぞれ約0.24および0.7となる。 T が4 s 以上になると、片面スリット直立護岸での反射率は大きくなり、約0.8である。消波層を有する場合には、周期が長くなっても反射率は0.6を越えることはなく、港内での長周期波増幅の低減が可能である。

図-6に消波層長の違いによる反射率の変化を示す。中央粒径は30 mmである。孤立波と規則波の両ケースで消波層長が長くなると反射率は低下する。孤立波の場合には消波長が200 cmで、反射率が0.8程度になる。規則波の場合には消波層の効果が顕著に現れ、十分長くなると反射率は0.5になる。したがって、波の種類によって低下の割合は変化するが、総合評価として長周期波対策護岸の反射率は、粒径がある程度までは、大きいほど、消波層が長いほど反射率は小さくなる傾向を持つ。

消波層の影響を詳しく検討するために、波長で無次元化した相対消波長と反射率の関係を調べた。図-7は波高4 cmの規則波がスリット空隙率50%の消波岸壁に作用したときの反射率の変化である。中央粒径は30 mmである。相対消波層長 B/L が長くなると反射率は低下する。 B/L が0.2程度までは、消波層長の変化に比して反射率は顕著に低下している。ただし、 B/L が0.2以上になると反射率の低下の割合は緩やかになり、 B/L が0.2から0.4まで2倍に増加しても、反射率は30%低下するだけである。消波層長の長さには、建設コストに対して最も効果が大きい最適長が存在すると考えられる。

4. 数値解析法の適用性

長周期波対策消波護岸の反射性能は流体直接解析法で計算できる。計算では、図-1と同様に同一断面で水面か

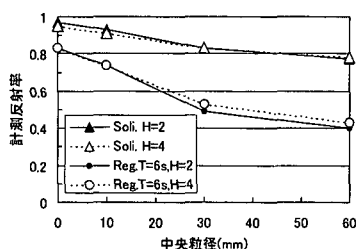


図-4 中央粒径による消波岸壁の反射率変化

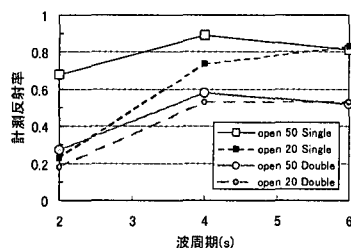


図-5 波周期による消波岸壁の反射率変化

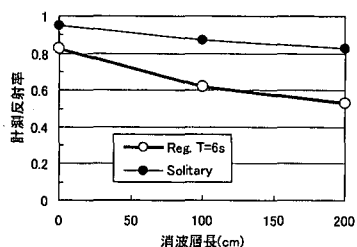


図-6 消波層長の違いによる反射率の変化

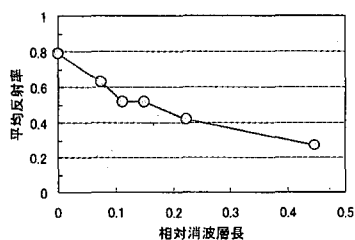


図-7 相対消波層長と岸壁反射率

らマウンド天端までケーソンが設置され、スリット空隙率20%の場合のスリット柱の幅と間隔を、それぞれ5 cm, 1.25 cmとした。数値波動水路の全長は44 mで、造波境界から水深と波高に対応した孤立波と規則波の水平方向流速を入力し、時間間隔 $\Delta t = 0.2$ sで各格子の流速ならびに流体占有率を計算して波形変化を求めた。透水層内での流体抵抗は、移動や変形を生じない固形粒子からなる多孔体を仮定し、多孔体中での流体の運動方程式中で検討し、単位体積の流体が固体部分より受ける力 F

を、次に示す Ergun 式 (流体力学ハンドブック, 1998) で評価した。

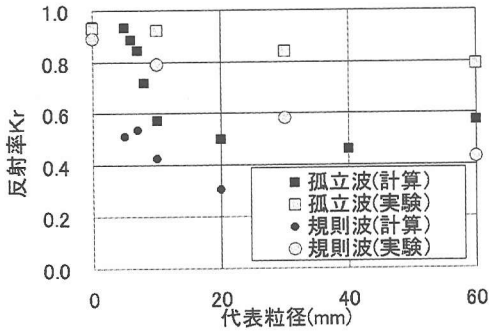
$$F = -\frac{150\mu(1-\epsilon)^2}{d_p^2 \epsilon^3} \epsilon u - \frac{1.75\rho(1-\epsilon)}{d_p \epsilon^3} \epsilon u |\epsilon u| \dots (1)$$

ここに、 d_p : 平均粒径, u : 流速, ϵ : 多孔体の空隙率, μ : 流体粘度, ρ : 流体密度である。ただし、上式では多孔体は平均直径 d_p の球で充填されていると仮定されているので、本実験のように粒径がばらついた碎石層で透水層が構成されている場合には、計算と実験結果が一致しない。そこで、粒径を変えて多くの計算を実施して、計算反射率を実験での計測反射率と比較した。次に、計測反射率が一致する計算結果に相当する粒径を、計算上の修正粒径として採用し、反射波形を推定する手法を提案した。

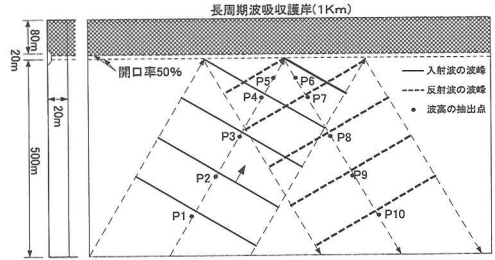
図-8に、実験での計測反射率と計算波形から求めた反射率の比較を示す。孤立波のケースは実験と同一の波形を入力させている。規則波は、計算時間を短縮化するために沖側境界から2波だけを入射させて造波を止め、沖側では入射波と反射波が別個に計測できるようにして、沖側の観測点で得られる護岸からの反射波形の水位から反射率を決定した。図-9に数値波動水路内の観測点で得られた波形を示す。ここでは、P. 3点での入射波形と反射波形の最高水位の比を反射率と定義した。計算規則波の波高、周期は4 cm および 4 s で一定とし、消波層長は、いずれの場合も200 cmである。

図-8に示すように、孤立波の計算反射率は、粒径が10 mm以上では急速に低下し、 $K_R = 0.5$ でほぼ一定になる。計測反射率は、粒径が大きくなっても大幅に低下せず、 $d_p = 60$ mmで約0.8である。計算では、10 mm以下の時に反射率が0.8~0.9となっている。実験結果を再現するためには、消波層中の代表粒径をそのまま入力するのではなく、本実験条件での修正粒径として、実験に使用した粒径の約1/10程度のものを計算で与える必要がある。規則波の場合にも、同一粒径では実験値が計算値よりも大きくなる。実験での粒径60 mmの場合の反射率0.45を再現するためには、計算では数mm程度の修正粒径を与えると反射率は0.5程度になり、実験値とほぼ一致する。図-8の比較から、実験で対象とした消波岸壁の反射率を数値計算で再現するには、修正粒径を導入して、その粒径を実験値の1/10程度にしておく必要があることがわかる。

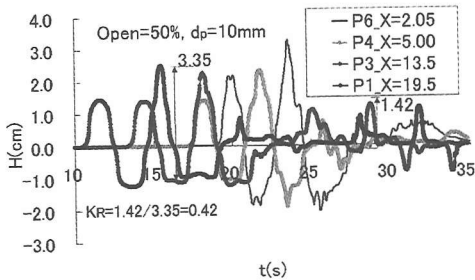
次に、修正粒径を用いて平面的な消波岸壁の効果を調べた。図-10に計算領域を示す。ここでは水深20 m、長さ1 km、消波層幅80 mの長周期波対策護岸に高さ40 cmの孤立波が斜め入射している。スリットの開口率は50%で、平面計算ではスリット形状を格子地形で表さずに、スリット配置線上の格子の平均開口率として評価し



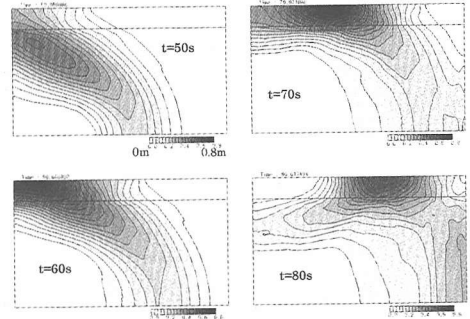
図—8 計算と実験での消波岸壁反射率の比較



図—10 斜め入射を対象とした平面計算の地形



図—9 長周期波対応岸壁前面での計算波形



図—11 孤立波の水位分布の変化

た。現地では、数十 cm 以上の異形碎石を消波層として使用するの、修正粒径を 10 cm とした。孤立波の波向は、岸壁法線から 45°傾いており、孤立波の先端が境界に到達してから反射波が P. 10 で観測できるまで計算を実施した。

図—11 に $t=50\sim 80$ s における水位の分布を示す。消波層に侵入した波は、反射するときの抵抗が生じるので主な水塊は、消波層内を幅方向に移動する様子が現れた。したがって、P. 8 および P. 9 では明瞭な反射波のピークが観測できず、入射波のピークに対する波形のピーク高さで反射率を定義すると、 $K_R=0.4$ 程度になり、直入射波よりも消波岸壁での反射波低減効果が顕著に現れた。

5. あとがき

本研究では、長周期波対策護岸の反射率を実験で検証

した。本実験範囲では、消波層の長さや粒径が大きくなるほど反射率は低下した。MARS 法を活用した数値計算では、消波層の粒径を修正することにより、実験結果と一致させることができた。斜め入射の場合には、直入射より反射率が低下した。計算において、(株)ソフトウェアクレイドル技術部島田昌也氏の協力を受けたことに感謝する。

参考文献

- 日本流体力学会 (1998): 流体力学ハンドブック, 丸善, pp. 305-306.
- 平石哲也・宮地 豊・石井幸生・佐藤峰雄・立石賢吾・松浦邦明・仲井圭二・山川 真 (2001): 発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 1356-1360.
- 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.