

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1093

December 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

平石 哲也

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. 現地観測に基づく長周期波対策工の効果	4
2.1 現地での長周期波の特性と荷役限界波高	4
2.2 防波堤による長周期波対策の適用性	7
2.3 港内消波対策の効果	9
3. 長周期波対策護岸の模型実験	11
3.1 模型実験の目的	11
3.2 模型実験の内容	11
3.3 実験の結果	13
4. 数値計算法の開発	14
4.1 数値計算法の内容	14
4.2 数値計算の結果	16
4.3 数値計算法の適用性	18
5. まとめ	20
参考文献	20
記号表	21

Physical and Numerical Test on Applicability of Long Period Wave Absorbing Sea Wall

Tetsuya HIRAISHI*

Synopsis

Long period waves with periods of 30 to 300s sometimes cause the large surging motion in mooring cargo vessels due to resonance. The interruption in cargo handling and break of mooring rope may be induced when the ship surging motion becomes remarkable. A new type sea wall composed of the double face slit caisson and rubble layer backward has been proposed in order to reduce the long period wave heights in harbor.

A series of model experiments on efficiency of the long period wave absorbing sea wall were carried out. The experimental results demonstrated that the long period wave reflection coefficient became about 0.7 when the appropriate total length and diameter of rubbles were employed.

A numerical model applying the direct fluid analysis method was developed to estimate the long period wave reflection profiles for the various type wave absorbing sea walls. The model was verified in comparison with the experimental results. The significant efficiency of long period wave absorbing sea wall in oblique incident wave field was numerically demonstrated.

Key Words: Long period wave, Sea wall, MARS model, Hydraulic model test, Wave reflection

*Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department, Dr.Eng.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

長周期波対策護岸の効果に関する模型実験と数値計算

平石 哲也*

要 旨

周期数十秒～数分の長周期波が港内へ侵入すると、係留系との共振によって、大型船舶に振幅の大きいサージングやスウェイング動揺が引き起こされ、動揺が大きくなると、荷役作業が中断されたり、係留ロープが切断されることがある。このような長周期波による荷役障害対策として、新しい港内消波工「長周期波対策護岸」の整備が提案された。これは、海側と裏込め側の両面にスリットを有するケーソンを活用し、裏込め材を透過性の砕石層として、長周期波の反射率を下げることを目指している。ここでは、まず水路実験によって、長周期波対策護岸の反射率が測定され、実験範囲では、砕石の粒径および砕石層の長さが大きくなるほど反射率が低下し、おおよそ 0.7 になることが示された。

次に、直接流体解析法を応用して、長周期波対策護岸近傍での 3 次元流体運動を解析できる計算法が提案され、この計算法の適用性は、模型実験で検証されている。また、数値解析によって、砂浜や通常の直立消波護岸と長周期波対策護岸の反射特性が比較された。その結果、長周期波対策護岸は、長周期波に対して、砂浜と同様な消波機能を有し、斜め波の場合には、その消波効果がより上がることが推測された。

キーワード：長周期波，長周期波対策護岸，直接流体解析法，水路実験，反射率

* 海洋・水工部波浪研究室長，博士（工学）
〒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：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:hiraiishi@pari.go.jp

1. まえがき

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る荷役障害が、近年、各地の港湾で報告されており、特に苫小牧港から鹿島港にかけての太平洋沿岸の港湾で顕著になっている(平石ら, 1996, Hiraishi et al, 2003). 荷役障害の原因は、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許容値を超えることにより引き起こされている。これは、船体と係留索からなる振動が、長周期波との共振によって励起されたもので、荷役効率を向上させ、港湾の経済性と安全性を確保するためには、その対策が緊急に必要である。

長周期波による荷役障害への効果的な対策として、

- 1) 防波堤の延伸や波除堤の新設による港内へ侵入する長周期波エネルギーを低減させる(平石ら, 2001a).
- 2) 港内に遊水池等を設置して増幅特性を変化させる(平石ら, 1997a).
- 3) 係留索の材質を改善し、共振を防ぐ(白石ら, 1995).
- 4) 長周期波の発生を予測して荷役時間を調整する(平石ら, 1997a).

等がこれまでに提案されている。このうち、小名浜港等では、1)の波除堤新設案が計画され、能代港では、3)の係留索の変更が実施されている。4)については、いまだ高精度の予測式は提案されていないが、橋本ら(2001)が気象モデルを活用した予測法を提案し、笹ら(2001)は台風時の気象データから荷役可否判断を試みている。港内の遊水池は、港奥の未整備地区の自然海浜前面などが相当し、港内整備事業が進められると減少していくので、環境整備と連携させて保存する方がよい。

これらの対策法を取りまとめ、2004年4月に財団法人沿岸開発技術研究センターより“港内長周期波対策マニュアル”が刊行された。著者はマニュアルの執筆にも参加し、上記の対策の具体例を示すとともに、もう一つの対策として港内の消波を提案した。港内の長周期波の消波は、波高増幅を抑制することができる有効な対策であり、以前から実現が期待されていた。しかし、具体的な工法が提案されておらず、現在のところ長周期波対策として施工された例はない。

一方、著者は横須賀市馬堀海岸の高潮対策事業の設計に関する委員会メンバーとして以前から活動し、両面スリットケーソンの裏込め部に越波を浸透させ、背後地への越波を防止する親水性高潮防護施設の開発に関わってきた。この施設は1998年から実際に工事が実施され、2004年7月には第1期300mの工事が完成する。工事を通して、

裏込め材の安定性や水質への影響をモニタリングしてきたが、裏込め材の海水への流出、施設の沈下、水質の悪化は生じていない。そこで、本施設の構造を活用して長周期波の反射を抑止する港内の護岸形状を提案し、“長周期波対策護岸”と名付ける。

ここでは、最初に港内の長周期波対策の成果を評価する指標を示し、防波堤延伸による長周期波対策の効果を説明する。防波堤延伸に代わる工法として長周期波対策護岸を位置づけ、護岸設置による長周期波対策の効果を説明する。次に、模型実験と数値計算で長周期波対策護岸による長周期波反射率を検討し、現地における適用性を示す。

2. 現地観測に基づく長周期波対策工の効果

2.1 現地での長周期波の特性と荷役限界波高

沖合防波堤を最適方向へ延伸し、侵入する長周期波のエネルギーを低減することは、長周期波だけでなく、うねりによる港内擾乱を防止するために重要である。しかし、延伸形状や延伸長を決めるための指標は未だ確立されていない。また、完成形状に達していない港湾における暫定供用バースの使用可能性に対する判定も明確にされていない。指標の一つとして、対象岸壁の長周期波に対する荷役稼働率が提案されている(平石ら, 1998)。これは、風波の出現頻度分布を整理した結果から、長周期波標準スペクトル(平石ら, 1997b)を用いて風波の波高と周期に対応する長周期波高を推定し、線形長波の伝播計算によって対象岸壁前面の長周期波高を求め、荷役限界波高以下の頻度を荷役稼働率として定義する。

この手法は、防波堤の延伸方向を決定するための近似推定法として適しているものの、風波と長周期波の波向を同一と仮定し、荷役可能限界波高を苫小牧港での設定値(菅沼ら, 1995)から導いており、全国の港湾での汎用性は低い。そこで、現地観測から荷役限界波高を設定するとともに、観測結果から導いた波向分布を用いる荷役稼働率算定手法を提案するとともに、比較的建設が容易な波除堤を用いた長周期波対策法の適用性を検討する。

(1) 観測の概要

長周期波の現地観測は東北地方I港、関東地方H港の港外の水深20m以上の沖合観測点と港内の複数観測点で2000年2～3月(春期)と8～10月(秋期)に0.5s間隔で60日間連続で水位および水平2成分流速データを取得した。水位データについては、フーリエ解析を実施し、周期20sより長い成分から長周期波形を再合成し、有義波高・周期を求めた。長周期波の波向は、10周期分の水平2成分

長周期流速 u と v を用いて、卓越波向 θ として計算した。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\overline{uv}}{\overline{u^2} - \overline{v^2}} \quad (1)$$

ここで、波向 θ は、 u の正方向から時計回りに測られる角度で、 $\overline{\quad}$ は、観測した変数の平均値である。波向の現地観測データは16方位で整理した。

図-1にI港の観測点を示す。図中のNo.1は、水深20mの港外の沖波観測点で、水位変化と水平2成分流速を測定した。港内観測点のNo.3は、荷役障害が生じている岸壁Qより20m離して海底に設置した水位・流速計である。観測データ中の風波成分の解析においては、波形を統計処理し、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ およびEMEP(Hashimoto, et.al.,1994)で求めた主波向 θ_p を整理した。H港の観測点は後述の図-7で示す沖合の水深20m地点である。ここでは港内は水位計測のみで流速は観測していない。収集した長周期波形は、スペクトル解析し、周波数毎に港内と港外のスペクトル密度の比の平方根を求め、各周波数帯の長周期波高比を求めた。

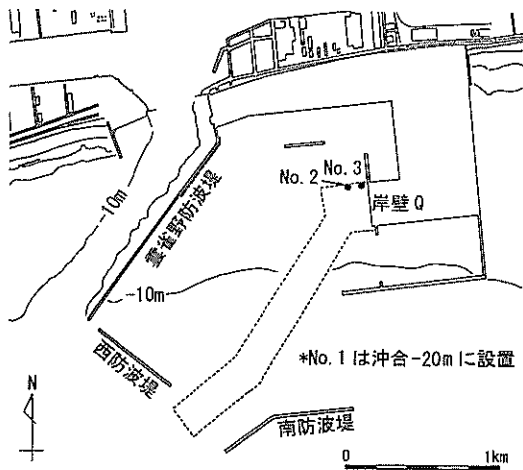


図-1 I港における波浪観測点

船体の動揺観測は2000年2月24日および10月18日に約6000DWTの貨物船を対象として、図-1の岸壁Qで実施した。観測では、港内波高計で長周期および短周期波の変化を計測すると同時に、ブリッジ頂上に取り付けたアンテナを用いて衛星による地上位置観測(GPS)法を用いて船体のサージング、スウェイング、ヒーピングの移動量を測定した。

(2) 観測の結果

図-2にI港No.1~No.3における流速ベクトルの散布図

の一例を示す。1時間程度の長時間観測値の散布図を作成すると図示点数が多くなり、図面が煩雑になる。ここでは、観測時間 t を8~10分および10~12分に分割し、それぞれ周期帯1($f=1/20 \sim 1/1(1/s)$)、周期帯2($f=1/40 \sim 1/20(1/s)$)および周期帯3($f=1/60 \sim 1/40(1/s)$)での流速の散布図を求めた。なお、図中には周期帯1と周期帯2のみを示す。図の縦軸および横軸がそれぞれ、南北成分および東西成分流速に相当する。風波の周波数帯における流速散布図には卓越方向が顕著に表れている。長周期波の周波数帯では楕円状の散布図が表れており、楕円の長軸を求めることにより流速の卓越方向を求めることができる。卓越方向は岸と沖方向に表れるので、沖合の方向を示す長軸向きを長周期波の波向とした。

図-3は、I港No.1における観測波高 $H_{1/3}$ と波向 θ_p の経時変化を示したものである。2000年8月13~15日、10月17~19日には $H_{1/3}$ は1.0mより大きくなり、長周期波成分有義波高 $H_{1/3}$ も0.1mより大きくなる。 $H_{1/3}$ のピークが出現するときには、 $H_{1/3}$ もピークを示し、長周期波と短周期波の相関は強い。したがって、短周期波のスペクトル形から長周期波エネルギーを類推する近似手法(平石ら,1997b)は有効である。しかし、波向を比較すると、短周期波の場合には、波高が大きくなると、ほとんどの時間帯に波向はSEで示されるが、長周期波にはSWの波向が顕著に出現しており、短周期波の波向で代表させると誤差が大きくなるのが推測できる。

図-4は、夏の観測期間(2000年8月10日~10月20日)の短周期および長周期波の波向別波高出現頻度分布を示したものである。短周期波の波向は、SSEが卓越し、出現頻度は70%を越えている。対策工法としては、SSE波向の入射波を遮蔽できるように防波堤の延長を図ればよい。

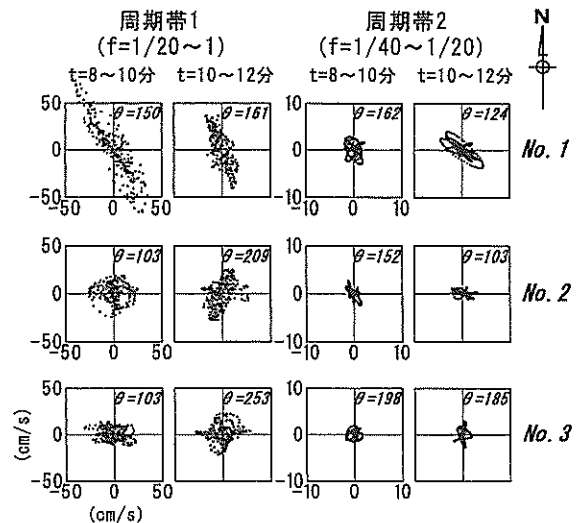


図-2 観測流速ベクトルの散布図

表-1 船体動揺時の海象状況(測点No.3)

月	時	風波		長周期波		風速	風向
		$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{L1/3}$	$T_{L1/3}$		
10							
日		m	s	cm	S	m/s	
18	12:00	0.44	2.6	5.5	47.0	10.2	NW
	14:00	0.45	2.6	5.4	52.2	11.3	NW
	16:00	0.34	3.3	4.4	46.7	8.1	WNW
19	8:00	0.18	7.7	2.5	55.4	0.4	WNW

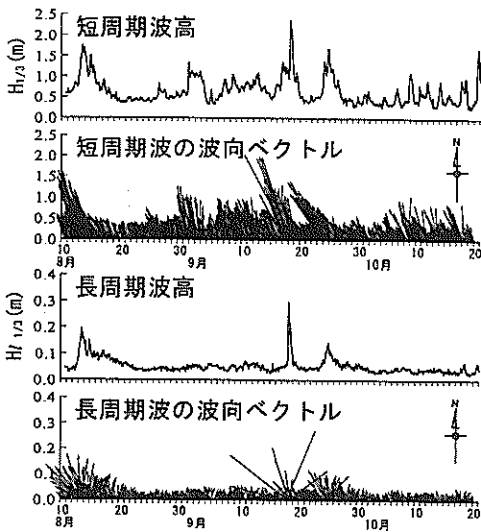


図-3 観測波高と波向の経時変化

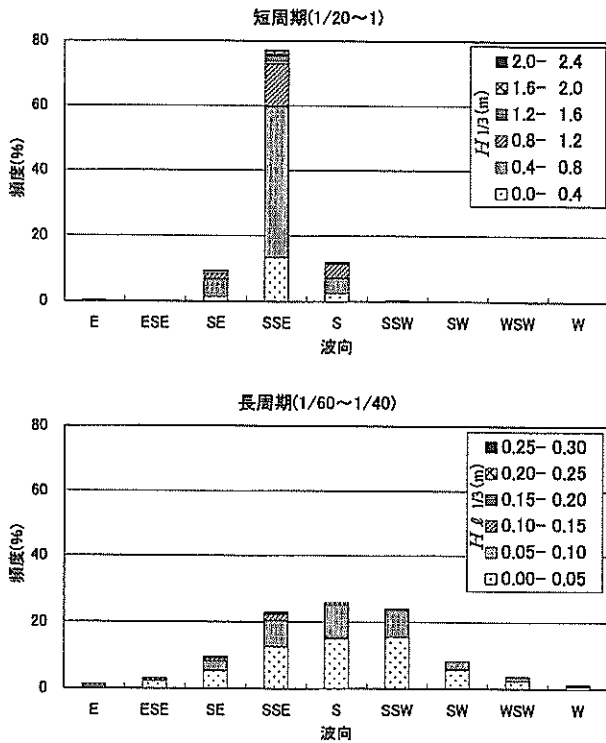


図-4 風波と長周期波の波向出現頻度

一方、長周期波の波向はSを中心にWからEまで幅広く分布しており、特定方向だけの入射長周期波だけでなく、観測波向全範囲について有効な対策を図る必要がある。

次に船体動揺観測の結果を示す。表-1に、夏期における動揺観測時の港内の波浪状況を示す。対象岸壁前面

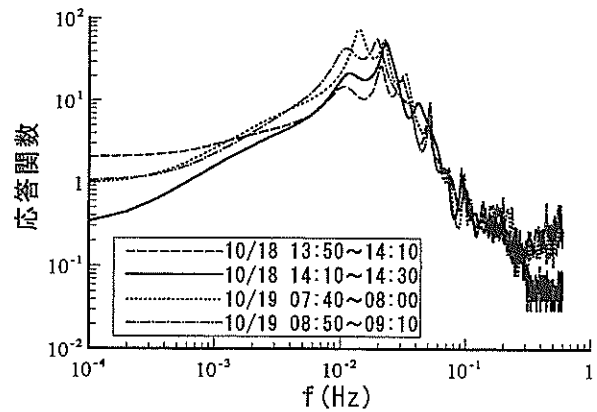


図-5 サージング動揺の応答関数

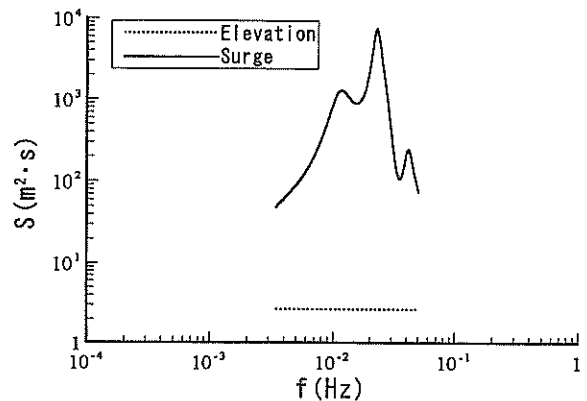


図-6 長周期波と推定サージング運動のスペクトル

での長周期波高は5cm程度で、本観測期間中でも小さい方である。観測水位、船体変位の波形をスペクトル解析し、船体変位のスペクトル密度を水位のそれで除し、平方根をとって応答関数を求めた。図-5にサージング運動の応答関数を示す。応答関数のピークは80になり、周期100s程度の長周期波成分によってサージング運動が励起される。

観測期間中の岸壁前面測点No.3の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ から標準スペクトル形を用いて、船体へ作用する長周期波の周波数スペクトルを求めると周期20~300sの範囲で、密度一定のスペクトル形を得る。長周期波スペクトルに、観測で

求めた応答スペクトルを乗ずることにより、船体動揺に相当するスペクトル形を得る。図-6は、サージ運動のスペクトル形の算出例である。この動揺スペクトルのフーリエ逆変換により、サージ動揺の波形が推算できるので、動揺の有義振幅等の統計量が求められる。

夏期および冬期の観測結果から、港内No.3での長周期波の有義波高 $H_{1/3}$ を1cmとした場合のサージ振幅最大値を推定すると、それぞれ、25cmおよび15cmになった。サージ振幅の許容値については、貨物船が障害無く荷役できる数値として、2.0mが提案されている(Ueda, et al, 1988)。したがって、岸壁Qでの観測水位とサージ動揺の比率を用いると、荷役限界長周期波高 $H_{1/3}$ は、夏期および冬期に関して、それぞれ $200/25=8\text{cm}$ および $200/15=13\text{cm}$ として設定できる。港湾施設の設計基準(日本港湾協会, 1999)では、苫小牧港での石炭船の事故例から、長周期波の荷役限界波高として10~15cmを提案しており、本観測によって得られた限界波高は、基準に提案された値よりも小さく、長周期波荷役限界波高は、船舶の係留状態、トン数の違いによっても変動し、各港における荷役障害時の波高観測結果から推定する必要がある。このように現地調査でサージングに対する荷役限界波高 $H_{1/3}$ が観測された場合には、10cm以外の値を採用しても良い。

2.2 防波堤による長周期波対策の適用性

(1) 対策工の配置例

次に、長周期波による荷役障害の対策工法の適用性を検討した。港内の長周期波対策としては、係留索の材質を変更して共振現象を軽減する工法(白石ら, 1995)や長周期波の48~72時間後の波高変化を予測し、警報を伝達して波高増大時の荷役や係留をできるだけ避ける手法(菅原ら, 1995)が提案されている。ただし、係留索の材質を変更しても、別の周期帯の波と共振する可能性がある。警報システムは被害を軽減できるが、荷役時間を制限することになり港湾の有用性の低下を招く。防波堤を延伸し、侵入する長周期波を抑止する工法は、卓越周期が変化する長周期波や短周期波に対しても有効で、港湾の安全性を向上させ、静穏な水域を広くすることができ、最も適用性が高いと考えられる。

できるだけ小さな費用で、短期間に長周期波対策を図る暫定的な工法として、本調査では、仮設防波堤による波除堤案の適用性を検討した。これは、将来、沖防波堤を延長するために必要とされるケーソン函を港口部の波除堤として仮置きしておくものである。仮設堤として製作すればよいので、設計波高が小さく、通常被覆ブロックを施工しないので、建設費は比較的小さい。

ここでは、港形が比較的簡単で、防波堤延長の効果が明瞭に表れるH港をモデルとして波除堤による対策工法を検討した。H港などの長周期波対策を必要とする港湾では港外の波浪観測点の一つ有しているが、港内では特定期を除いては波浪観測を実施しない。港内の長周期波高、周期を推定する数値計算法としては、ブシネスクタイプ伝播計算モデル(平山ら, 2000)を用いた。

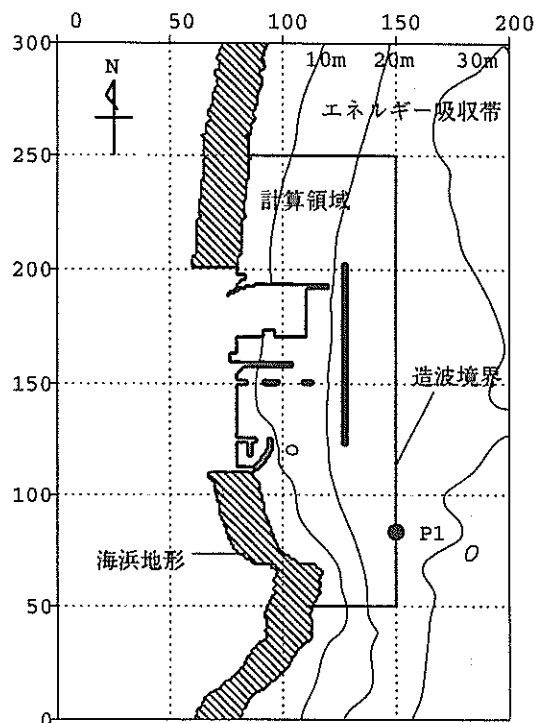


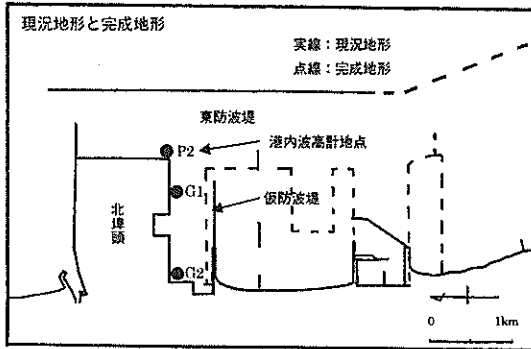
図-7 モデル港湾の計算地点と現地沖波観測点

図-7にH港をモデルとした計算格子地形を示す。図中の観測点P1は、現地における沖波観測点である。H港周辺には自然海浜が多数存在し、数値計算においても海浜による長周期波の反射率低減効果を考慮する必要がある。長周期波の反射率について、岡安ら(1998)が、0.7程度の反射率を提案している。本調査では、図-7の斜線で示された海浜地形において2000m幅のスポンジ層を設け、長周期波エネルギーの吸収を図った。平面計算にさきだって簡単な数値波動水路(平石ら, 2000)において周期100sの規則波を入射させ、幅2000mのスポンジ層の反射率を検討したところ、0.7になることを確認した。

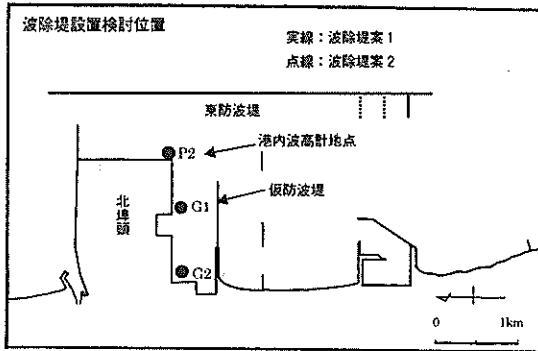
対策工の適用性を比較するために、港内代表点の港外入射波に対する波高比を求めた。H港ではSEからの長周期波が卓越することが明らかになっている(平石ら, 1998)ので、それに対して南側の防波堤を延長する将来港形と複数の波除堤案を提案した。図-8に、将来の完成港形と現況地形(1)、波除堤案(2)を示す。

(2) 対策工の効果

図-9に港内の船舶係留地点での波高比の計算結果を示す。現況では、P2、G1で波高比が1.5を越えており、長周期波の抑止効果は小さい。完成形状になると、港内のすべての代表点で、波高比は0.5以下になる。図-8(2)の波除堤案では、港口部に長さ200mの波除堤を単基設ける場合と3本の波除堤を平行に設ける場合を示した。



(1) 現況地形と完成港形



(2) 単基および複数基の波除堤設置位置
図-8 モデル港湾の長周期波対策工の例

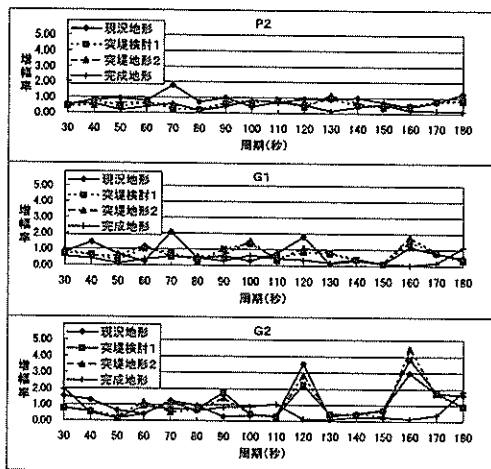


図-9 モデル港湾の周期別波高比

防波堤の沿い波抑止のためには波除堤を複数本建設することが有効と考えられが、長周期波に対しては、波除堤間で共振による水位の増幅が生じるために、図-9に示すようにP2およびG1における波高比は、単一波除堤を設置する方が小さくなり、P2とG1での波高比は現況より20%小さく、長周期波対策として適切である。

次に、対策工法の適用性を示す指標の一つである荷役稼働率を検討した。荷役可能限界波高は2.0で得られた $Ht/3$ を用いて、仮に8cmとした。沖合の長周期波頻度分布は、現地観測(平石ら, 1998)結果等を参考にして、表-2に示すものを用いた。各沖波条件での対象岸壁の波高は、図-9で示した波高比を乗じて計算できる。

表-2 沖側の長周期波高・波向頻度分布

$Ht/3$ (cm)	NNE	NE	ENE	E	ESE	Total
0- 5	1	127	734	448	16	1326
5- 10	3	342	1198	787	69	2399
10-15	1	136	188	155	25	505
15-20	0	29	36	25	10	100
20-25	1	11	6	6	4	28
25-	0	1	16	2	0	19
Total	6	646	2178	1423	124	4377

図-10にP2、G1、G2における全波向を合成した波高発生頻度より計算した年間の荷役稼働率を示す。図には、現況地形、完成港形、波除堤案1(単基)および波除堤案2(複数基)の場合を示した。稼働率は港内の地点によって異なり、現況地形のP2およびG1では90%が確保できるが、G2では80%である。港口部に単一の波除堤を設置すると、P2とG1で稼働率は92%となり、G2で84%が確保できる。完成港形では、3地点で稼働率は95%以上に上昇し、港湾の静穏性が高くなる。波除堤案は、完成港形に比べると稼働率は低いが、現況地形に比較すると港内の稼働率を上昇させることができることがわかる。したがって、波除堤工法は、沖側の防波堤を延伸し、港湾を完成させるまでの暫定的な対策工として活用できる。

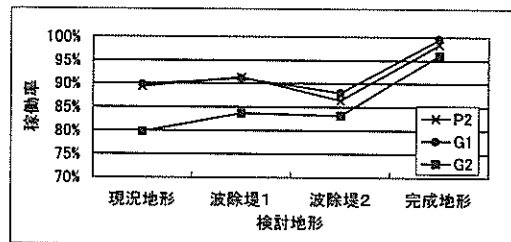


図-10 対策工法による荷役稼働率の変化

2.3 港内消波対策の効果

(1) 港内消波の提案

周期 30s 以上の長周期波を港内の岸壁やスリットケーソンや異形ブロックからなる消波護岸で吸収することは困難である。そのため、港奥では長周期波が反射のために波高増大を引き起こし、沖合防波堤のために入射エネルギーを減少させても、港内では長周期波高が減少しないことが生じる。逆に、多重反射系の構成により、岸壁の整備が進むと港奥の波高が増大するという逆説的な結果を生む要因となる。

長周期波の反射特性については、波崎海岸での解析例があり（岡安ら、1998）、砂浜海岸では反射率が 0.7 以下になることが示されている。そこで、港内でも自然や人工の砂浜や干潟が存在しておれば、港奥での多重反射が防止できると考えられる。港内の自然海浜の残存率と長周期波の波高分布の定量的な関係は調査例が無いので、明確な推定はできないが、全国的にも、整備が進んでおらず自然の砂浜や干潟が港内で多く残っている港湾では、近傍の港湾で長周期波の荷役障害が報告されていても、対象港湾での被害例は無く、静穏な水域が確保されているようである。このような港湾の例として、沖縄県那覇港、宮崎県宮崎港、新潟県新潟東港があげられる。船舶が大型化して大水深岸壁が必要になると港内の航路掘削が実施されるので、現在、長周期波が問題となっているような産業重点港において岸壁の近傍に砂浜や人工干潟を建設することは難しい。そこで、消波護岸として幅広く使われているスリットケーソン護岸を改良して、長周期波に対しても消波性を有する護岸形状を提案した。

岸壁の反射率を低下させ、港内の静穏度を上昇させるとともに、船舶の接岸点での波高軽減のために、大型港湾ではケーソンの前面にスリットを有する遊水部を設け、スリット内での入射波と反射波の干渉で消波機能を発揮させるスリットケーソン岸壁が一般的に用いられる。スリットケーソンの反射率は、遊水部の相対幅とスリットの開口部の面積比（開口率）で規定され（谷本ら、1982）、周期数秒の港内波に対して反射率が 0.5 程度になるように設計される。港湾の設計基準（日本港湾協会、1999）ではスリットケーソンからなる直立消波護岸や岸壁の反射率は、0.3~0.6 として提案されている。ただし、スリットの遊水幅は有義波周期で計算できる波長の 1/4 程度であり、不規則波の長周期波側のエネルギーに対しては十分な消波性能は有しておらず、その反射率は波の周期によって変化する（平山、2001）。周期が 30s 以上の長周期波に対してはほとんど消波効果を有しない。

横須賀馬堀海岸の高潮対策護岸整備事業では、風波に対する消波効果の向上と護岸背後の遊歩道部に越波した波の地下への排水を促進するために、海側と陸側の両面にスリットを有するケーソン護岸が使用された。図-11 は、馬堀海岸高潮対策護岸の標準部の模式断面を示す。小段部に続くケーソンの断面方向の長さ（スリット間隔）と鉛直高さは、ともに 5.0m である。海側（前面）スリットは幅 20cm で一函あたり 4 本設けられている。スリットの開口総延長/ケーソン幅を開口率 δ として定義すると $\delta = 0.2$ になる。ケーソンの側面にも遊水室内の空気圧を軽減するために開口率 0.2 のスリットが設けられている。ケーソンの陸側（後面）も同様な開口率 0.2 のスリットを有し、ここでは両面スリットケーソンと呼ぶ。これに対し、従来型の前面のみスリットを有するケーソンを片面スリットケーソンと呼ぶ。後面スリットの背後には直径 50cm 以上の雑石を配置し、ケーソン内への滑落を防止し、随時、直径の小さい雑石を投入して背後の裏込め層を形成している。碎石層の表層は、粒径を調整して平坦にできるので、一部を歩道とすることも可能である。

馬堀海岸護岸のケーソン設置工事は 2000 年 1 月から始まり、2002 年 4 月現在で総延長の一部の本体工事が終了している。写真-1 は、2002 年 4 月における馬堀海岸護岸の建設状況で、現在（2004.6）は上部の工事が進み、外部からは裏側のスリットは見えない。写真では設置後 1 年が経過しているが裏込め材の沈下やケーソン遊水室内部への雑石の滑落は生じていない。裏込め材への海水の侵入は水の濾過効果も生じており、前面の海底にはにごりが全く見られず、海草等の群生が生じていた。工事区間のケーソンは小型で、大水深岸壁へ対応させるためには、ケーソン函の安定性の確保など解決すべき技術課題はあるが、裏込め層の崩落の危険性は小さく、港湾においても両面スリットケーソンの活用を図ることが可能であろう。護岸の裏込め材が雑石であり、荷役物揚場として使用するためには、上面の舗装手法などに課題は残るが、スリット間隔を最小雑石径より小さくしておけば、吸い出し等の被害は生じない。

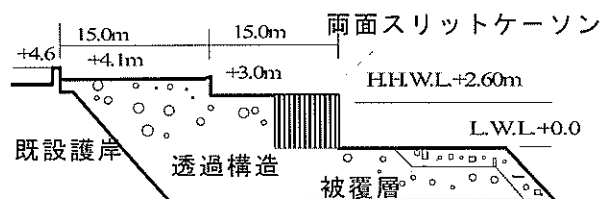


図-11 馬堀海岸高潮対策護岸の断面イメージ



写真-1 両面スリットケーソンを有する護岸の例

(2) 港湾における対策工の効果

モデル港の将来拡張案を対象に、両面スリットケーソン護岸や人工海浜を港奥に建設した場合の港内長周期波高の変化を調べた。図-12は、モデル港湾に有義波高1.0mの長周期波が図の向かって左斜め下方側から入射した場合の港内波高分布を示す。港奥の壁面Bは直立壁としている。なお、長周期波成分の波高分布はNOWT-PARI Ver. 4.6βに任意反射境界を付加したモデル(平山, 2001)で求めている。港外の海浜にはスポンジ層を配置し、吸収係数を調整して目的の反射率が得られるようにしている。目的とする反射率は0.7である。壁面Bの直前では、波高の局所的な増大が見られ、港奥部で長周期波が反射され、擾乱が大きくなっている現象が判る。次に壁面Bを反射率0.7の長周期波対策護岸に改良した場合の波高比の比較を行った。

図-13は、波高比をコンターで比較したもので、入射波高に対する港内波高比分布を示した。図では、実線で対策を行った場合、破線で対策の無い場合を示す。港奥の長周期波対策護岸の前面では波高比は約0.3である。しかし、破線で示した対策護岸が無い場合には波高比は0.6になり、長周期波高の差が大きい。また、港奥の岸壁直前だけでなく、港内の広い範囲にわたって波高比は変化しており、港奥部分を消波タイプとすることによって、港内の長周期波高をより小さくできることがわかる。

以上をまとめる。本章では、港湾の長周期波対策としては、沖合防波堤の延伸や波除堤の新設で港湾に入射する長周期波エネルギーを抑止する手法の効果を定量的に示すとともに、港内に長周期波対策護



図-12 モデル港湾における長周期波高の分布

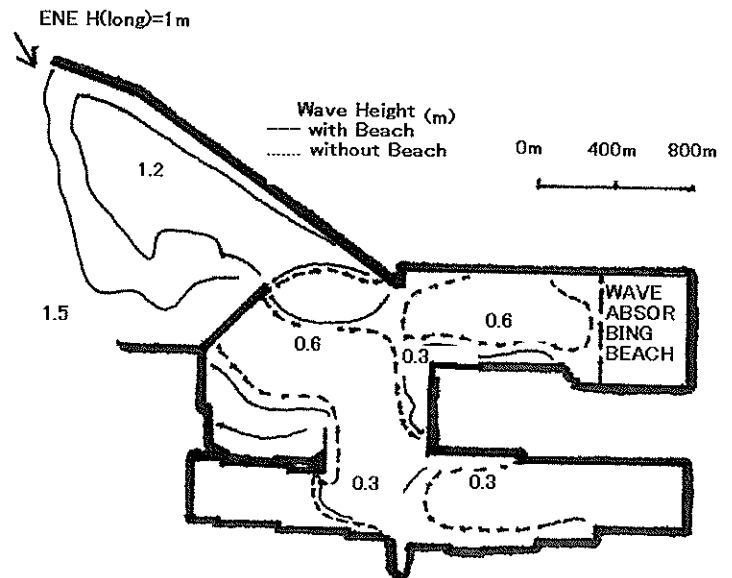


図-13 港内における波高比の比較

岸を適切に設置して、反射波による長周期波の増大を防ぐことが重要であることを示した。なお、本調査報告で

用いた図面および数値は、実際の現場設計に用いられているものではなく、限定された観測データからの試算であることに留意されたい。

3. 長周期波対策護岸の模型実験

3.1 模型実験の目的

前章では、港内における長周期波の反射率を0.7以下にできる消波帯を適切に設置すると、港内長周期波の波高が低減し、荷役稼働率が向上することを示した。その効果は沖合の防波堤を延伸した場合や波除堤を設置した場合と同様で、港奥部の遊休施設の改良事業等で同時に施工すれば、比較的短期間で長周期波対策が可能になると思われる。ここでは、提案した長周期波対策護岸が所定の機能を発揮できるのかどうかを模型実験で調べる。

まず、現地岸壁の1/20~1/40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岸壁の反射率を調べた。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50m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。

3.2 模型実験の内容

(1) 護岸の構成

図-14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10~20mとし、水槽での設置水深を50cmとする。縮尺は、1/40~1/20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10m程度と考えられるので、模型では40cmとする。現地で施工できる雑石の直径は最大で2m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、40~80mm、20~40mmおよび10~15mmの3種類とした。粒径にばらつきがあるのは、碎石の過程で一定粒径を維持することが困難であるためで、実験開始前に、目標粒径範の碎石を選定して用いた。消波層の幅は、1m(現地で20~40m)および2m(現地で40~80m)とした。図中の仕切り板は、消波層の幅を変化させるものである。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、背後のスリットと消波層の間には格子間隔1cm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。さらに比較のために、ケーソンと消波層の間に不透過の仕切り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。

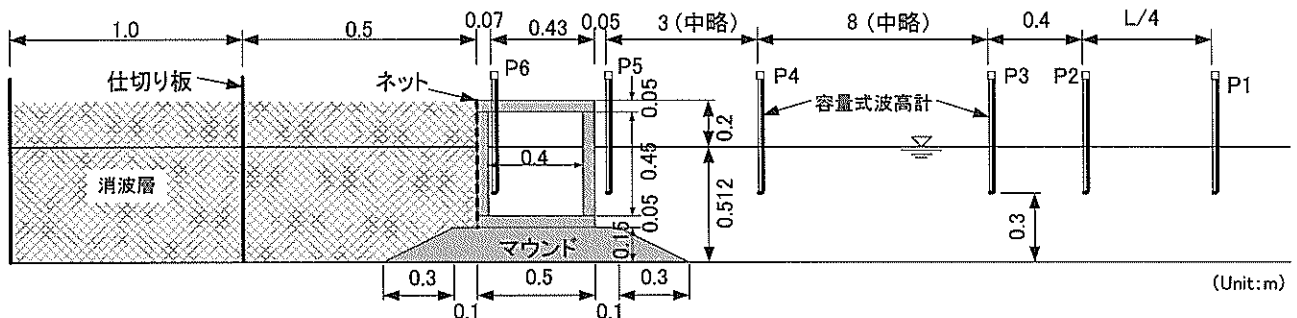


図-14 長周期波対応消波岸壁の構成と計測器の配置

(2) 実験装置の配置

前述の図-14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52m、1.0mおよび1.5mである。岸壁模型から約43m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50cm、周期60s程度である。縮尺を1/20とすると実験波高と周期は、2.5cmと13sとなる。波高は再現できるが、水槽長の制限で周期13s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

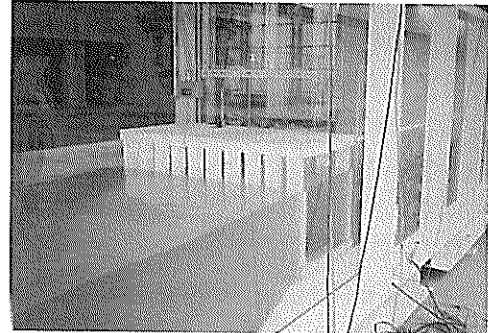
に対する適用性を検討するものとして、実験波の周期を、2から6s(現地で、8.9s、12.6sから26.8s、37.9s)とした。造波した波は、孤立波と規則波である。波高は、それぞれ2cmおよび4cmとした。表-3に実験条件一覧および反射率の計測結果を示す。

図の、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。P.1とP.2の間隔は計測波の波長Lの1/4とし、計測波の波長に応じて変化させた。実験では、P.1とP.2あるいはP.1とP.3の組合わせを用いて反射率を解析し、妥当な

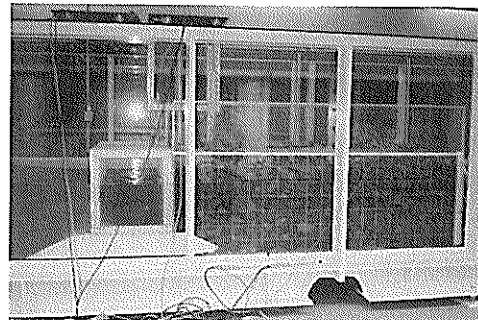
表—3 実験条件と計測反射率

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	2	0	100	40~80	0.83
					20~40	0.68
					5~15	0.74
			200		40~80	0.4
					20~40	0.49
					5~15	0.74
		4	0	100	40~80	0.62
					20~40	0.71
					5~15	0.43
			200		40~80	0.53
					20~40	0.74
					5~15	0.81
	50	2	100	40~80	0.65	
				20~40	0.75	
				5~15	0.45	
		200		40~80	0.48	
				20~40	0.72	
				5~15	0.81	
	2	20	0	100	40~80	0.35
					20~40	0.17
					5~15	0.23
			200		40~80	0.36
					20~40	0.13
					5~15	0.19
4		0	100	40~80	0.18	
				20~40	0.16	
				5~15	0.42	
		200		40~80	0.18	
				20~40	0.19	
				5~15	0.72	
50	2	0	100	40~80	0.29	
				20~40	0.54	
				5~15	0.18	
		200		40~80	0.27	
				20~40	0.54	
				5~15	0.68	
	4	0	100	40~80	0.26	
				20~40	0.52	
				5~15	0.12	
		200		40~80	0.27	
				20~40	0.52	
				5~15	0.77	
規則波	4	20	0	100	40~80	0.32
					20~40	0.65
					5~15	0.38
			200		40~80	0.47
					20~40	0.47
					5~15	0.66
		4	0	100	40~80	0.74
					20~40	0.41
					5~15	0.64
			200		40~80	0.45
					20~40	0.53
					5~15	0.64
	50	2	0	100	40~80	0.47
					20~40	0.76
					5~15	0.38
			200		40~80	0.49
					20~40	0.76
					5~15	0.89
		4	0	100	40~80	0.52
					20~40	0.79
					5~15	0.43
			200		40~80	0.58
					20~40	0.79
					5~15	0.83
20	2	0	100	40~80	0.68	
				20~40	0.74	
				5~15	0.4	
		200		40~80	0.49	
				20~40	0.74	
				5~15	0.83	
	4	0	100	40~80	0.62	
				20~40	0.71	
				5~15	0.43	
		200		40~80	0.53	
				20~40	0.74	
				5~15	0.81	
50	2	0	100	40~80	0.65	
				20~40	0.75	
				5~15	0.45	
		200		40~80	0.48	
				20~40	0.72	
				5~15	0.81	
	4	0	100	40~80	0.63	
				20~40	0.73	
				5~15	0.45	
		200		40~80	0.45	
				20~40	0.52	
				5~15	0.73	

値を示した方を採用している。水位データのサンプリング間隔は、0.05s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。写真—2に護岸模型の外観を示す。



(1) 正面外観



(2) 側面外観

写真—2 護岸模型の外観

(3) 反射率の解析

図—15は、消波層長2m、粒径20~40mm、スリット開口率20%の消波護岸に波高4cm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が現れている。入射波高は $H_I=3.91\text{cm}$ 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が重複し、大きな水位上昇が見られる。反射波は、再度 $t=22\text{s}$ 後にP.1で観測される。P.1での反射波高 H_R は2.98cmである。したがって沖合の波高計での観測波高比から反射率を定義すると、 $KR=H_R/H_I=0.76$ 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—3に示した反射率を求めた。

図—16は、図—15と同じ条件の消波岸壁に、周期6s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と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認められた。そこで、入・反射波分離計算法(合田ら, 1976)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-16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、 $KR=0.51$ を得た。

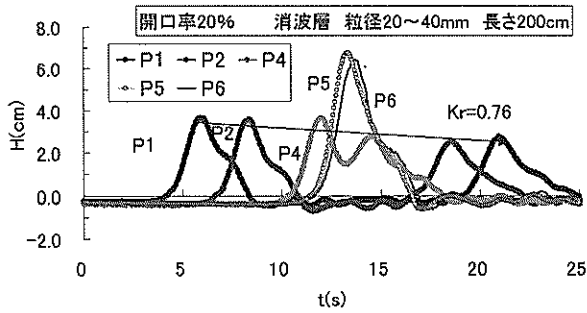


図-15 消波岸壁水路内での孤立波の波形変化

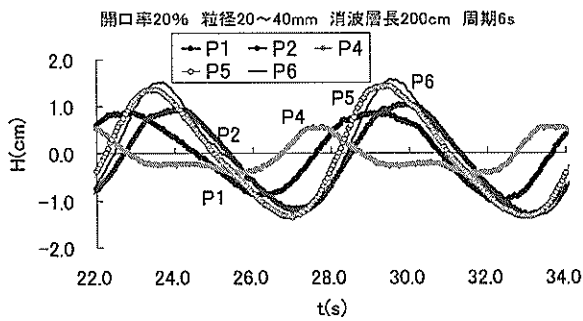


図-16 消波岸壁水路内での規則波の波形変化

3.3 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を調べた。図-17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200cm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、 $T=6s$ でも、粒径が60mm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、 $H < 4cm$ 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4cmで一定とした。

図-18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岸壁で、消波層は無い。“Double”は長さ200cmの消波層を有する両

面スリットケソン式岸壁である。スリットの空隙率は“open”で表した。 $T=2s$ では、スリット壁を有する直立消波岸壁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4s以上になると、片面スリット直立岸壁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。

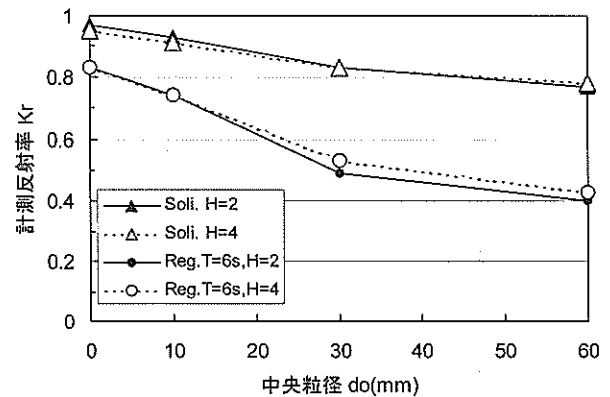


図-17 中央粒径による消波岸壁の反射率変化

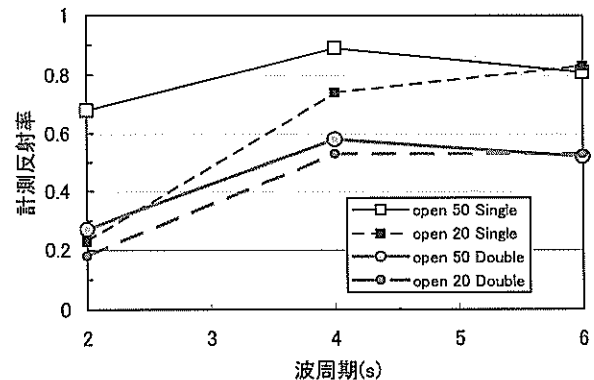


図-18 波周期による消波岸壁の反射率変化

図-19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30mm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層長が200cm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応岸壁の反射率は、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。図-20では、周期を横軸にとり、消波層の長さ毎に反射率を示した。現地ではうねりに相当する周期2sの場合には、消波層のない片面スリット

ケーソン護岸で反射率が0.7となり、相対的に消波効果を有している。消波層を付けると、反射率はさらに低下するので、長周期波対策護岸はうねりに対しても効果的な消波ができることがわかる。波周期が長くなり6sになると、消波層を付けないと反射率を0.7以下にすることができない。波周期が4sのときには、消波層の長さによって反射率が大きく変化すること無いが、波周期が6sになると消波層が長い程、反射率は小さくなる。したがって、目標の反射率を得るために最も長さを短くできる消波構造の開発が必要である。

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-21は波高4cm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30mm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。

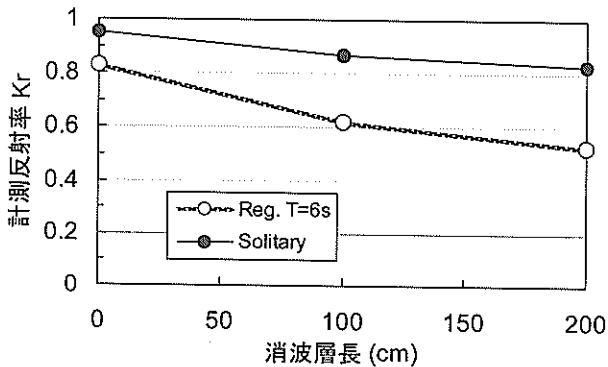


図-19 消波層長の違いによる反射率の変化

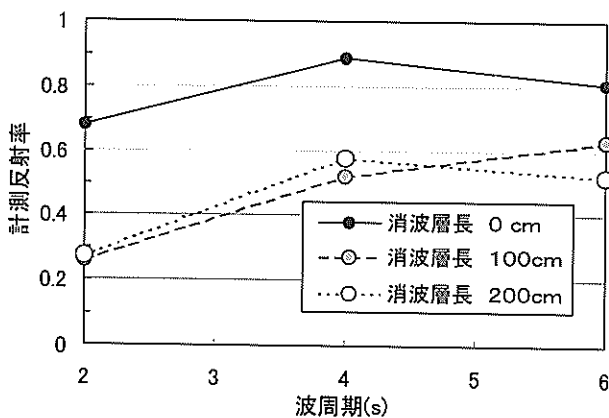


図-20 消波層長毎の波周期による反射率の変化

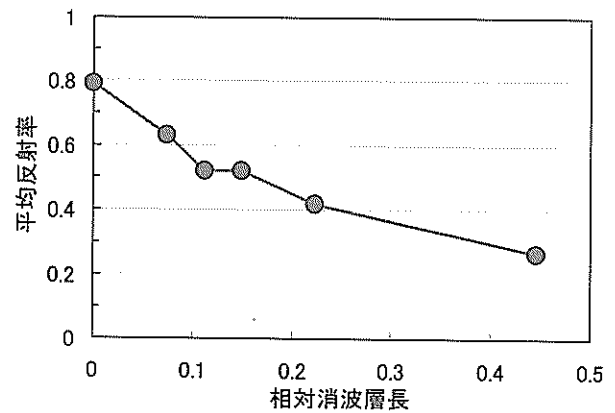


図-21 相対消波層長と岸壁反射率

4. 数値計算法の開発

4.1 数値計算法の内容

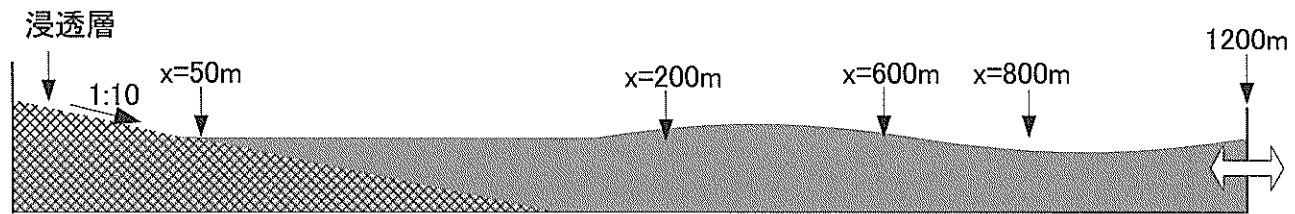
本研究では、護岸構造を単純化するために、同一断面で水面から水底までケーソンが設置され、ケーソン下部にはマウンドは無いものとしている。図-22(4)に本研究で対象とした両面スリットケーソンのイメージを示す。ケーソンの設置水深は10mで、スリットの開口率 δ は0.5とし、遊水部の幅は10mとした。スリット開口部の高さは水面上1.0mである。ケーソン背後の消波層の幅は40mとし、スリットの空隙よりも大きい直径の雑石を配することを想定して、基本ケースでは、現地で粒径20cmの固形粒子を有する多孔体からなる透水層として解析を行った。

計算では、ケーソンからの反射波や透水層内の水の移動を考慮し、また、スリットの開口部周辺の流体運動を解析しなければならないので3次元の数値波動水槽を適用する必要がある。ここでは、Navier-Stokes式の水粒子運動を3次元格子で計算できる手法として、流体直接解析法(MARS (Multi interface Advection and Reconstruction Solver)法)を採用した。本手法は、これまで、棧橋式岸壁の下層における風波の挙動(永瀬ら, 2000)や、津波の植樹林での減衰効果の計算(平石ら, 2001b)に適用され、構造物を越流する際の越流係数などの物理的な現象から導かれる定数を与えなくとも、構造物回りの流体運動を精度よく推定できることが示されている。また、津波氾濫水の挙動に関するモデルの適用性を示した安田・平石(2004)の解説も参考にできる。ここでは遡上津波の流体力を求めた前述のモデルを改良して長周期波の変形解析に用いた。

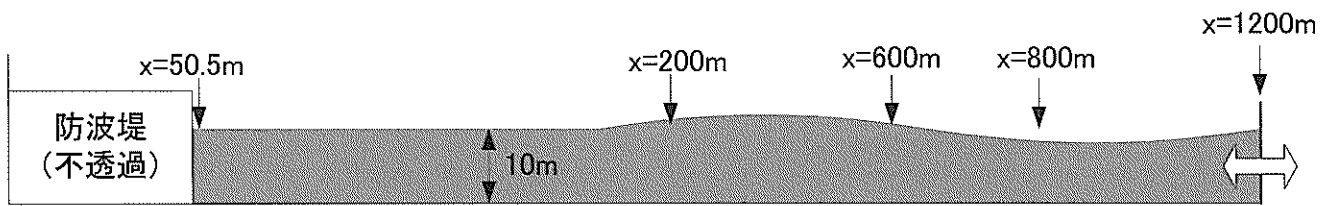
図-22に示すように、長さ1200mの数値波動水路を水平方向は長さ1.0m、鉛直方向は長さ0.2mの3次元格子で表した。図の奥行き方向の領域幅はスリットの形状が再現できるように20mとした。計算では、周期 $T=30$ および60sで波高1.0mの長周期波を2波だけ入射境界から造波し、水路内の

代表点での波形を解析することによって反射率を求めた。計算ケースは、両面スリットケーソン岸壁だけでなく、比較のために勾配1/10の自然海浜と両面スリットと開口率が同一で幅10mの遊水部を有する片面スリットケーソン岸壁

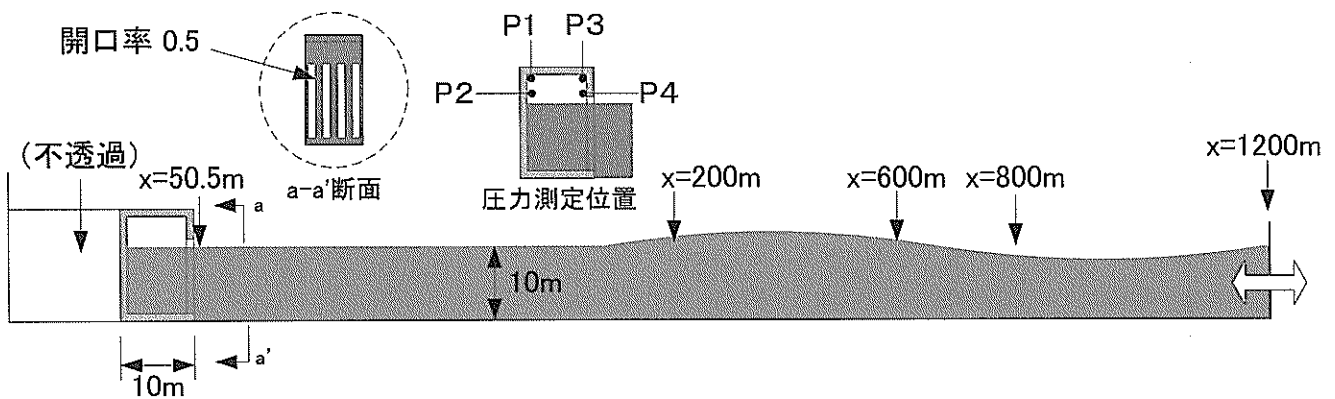
および建設コストが安価であり設置が容易な直立式のスリットを有しない岸壁を対象とした。自然海浜での砂粒子の粒径は、磯浜海岸を想定して1.0cmとした。



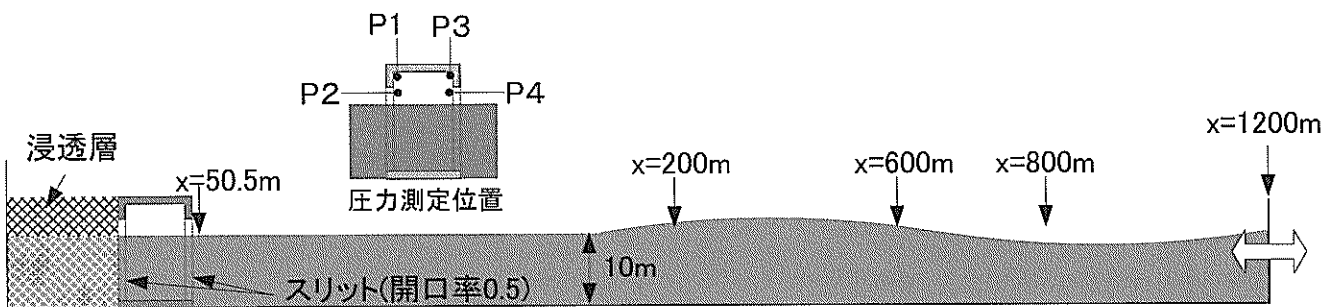
(1) 砂浜海岸



(2) 不透過護岸



(3) 従来型直立消波護岸



(4) 長周期波対策護岸

図-22 数値波動水路の模式

自然海浜や透水層内で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する。多孔体中での流体の運動方程式では、単位体積の流体が固体部分より受ける力 F を考慮する。計算では、流体が受ける力を次に示すErgun式(流体力学ハンドブック, 1998)で評価した。

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

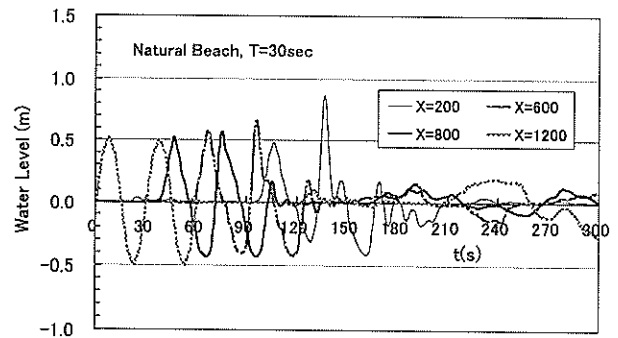
ここに、 d_p :平均粒径, u :流速, ε :多孔体の空隙率, μ :流体粘度, ρ :流体密度である。

MARS法では、透水層内の流速が求められるので、タイムステップ毎に、透水層内の多孔体による抵抗力が上式から導かれ、運動方程式中の流速が減衰する。計算のタイムステップは、 $\Delta t=0.5s$ とした。また、ケーソン本体などのすべての構造物は不透過体として、図に示すように透水層や自然海浜の陸側の計算境界は固定壁面とした。計算水路の水平方向座標の原点は、上記の陸側壁面とし、ここからの沖側への水平距離を X で表して観測点の位置を定義した。

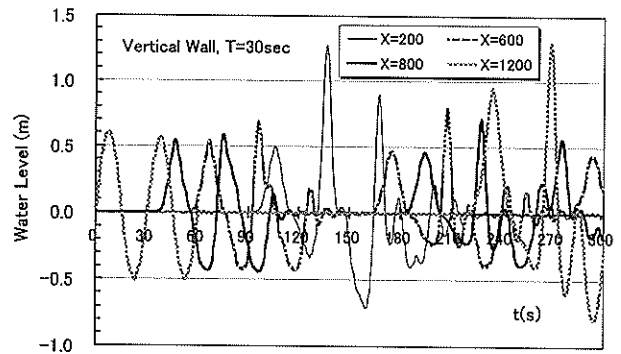
4.2 数値計算の結果

図-23は、図-22に示した計算地形に対して、周期 $T=30s$ 、波高 $H=1.0m$ の長周期波を入力させたときの護岸と自然海浜前面の代表測点における観測波形を示す。図の位置 X は前述の消波層背面から沖方向への距離を表す。 $X=200\sim 1200m$ の両面スリット岸壁前面の測点では、2波の入射波が観測された後に、反射波が観測され、反射波高は $0.32m$ になる。したがって、この波形の場合には 0.3 程度の反射率が得られている。直立壁の場合には、入射長周期波波形に対し、沖側の観測点でほぼ同一の反射波形が観測されており、直立壁の反射率は他の構造形式に比べて高いことがわかる。これは、本計算が計算過程でのエネルギー逸算等の影響を受けず、高精度で実行されていることを表す。片面スリットおよび両面スリットケーソン岸壁の反射波形を比較すると、計算が安定する水路中央部の $X=600$ および $800m$ での波形が特徴を有している。第1波の反射波高は、片面スリットケーソンの場合は、入射波高と同じか、やや小さくなる程度であるが、両面スリットケーソンの場合には、いずれの観測点でも波高は $0.5m$ 以下になる。第2波は、片面スリットケーソンの場合には、入射波より大きくなるが、両面スリットケーソンでは、波高も 50% 以下でピークの分裂が見られる。砂浜海岸では、斜面上での浸透が生じており、反射波の波形は明瞭ではない。

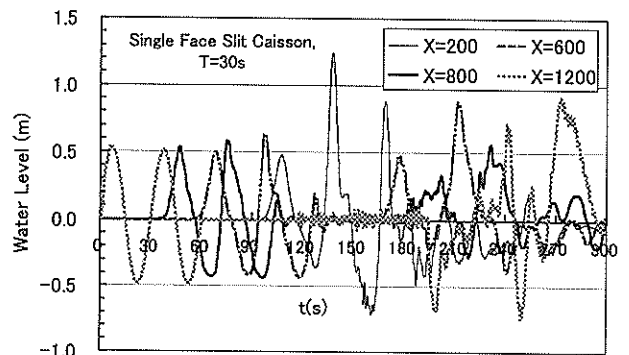
図-24は、周期 $T=60s$ の長周期波に対する入射波形と反射波形の計算結果を表す。長周期波の周期が長くなると第1波の反射波は第2波より大きく、反射波高が一定しない。



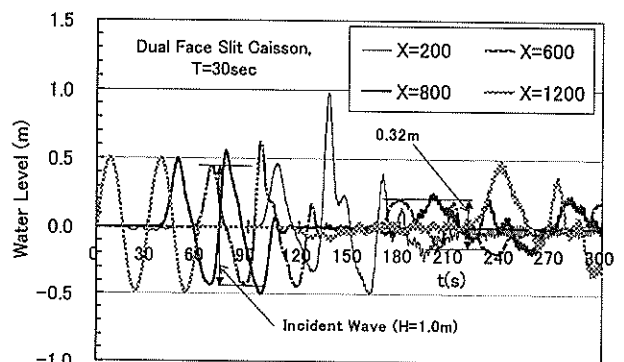
(1) 砂浜海岸



(2) 直立壁



(3) 片面スリットケーソン岸壁



(4) 両面スリットケーソン岸壁

図-23 護岸前面の計算波形 ($T=30s$)

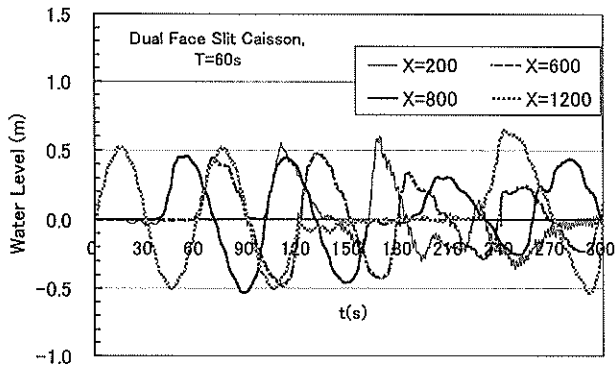


図-24 両面スリットケーソン壁前面の波形 (T=60s)

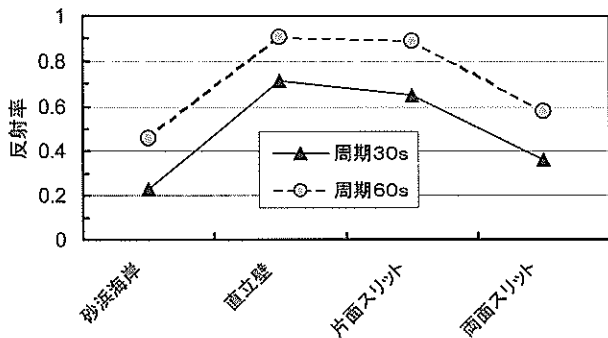


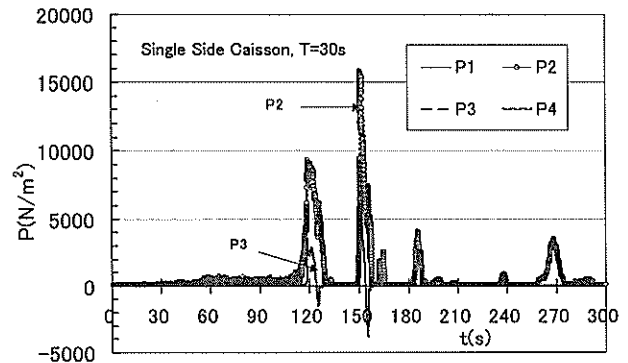
図-25 各種岸壁の反射率の比較

数値波動水路の総延長は、 $T=60s$ の場合には、2波の入射波が安定するのに不十分で、第2波の反射波をすべて計算するには多くの時間を有するので、沖側の $X=800m$ では第2波の波形全体が計算されていない。また、今回設定した透水層の幅が40mで比較的短いため、初期に流入した波が十分に減衰せずに水路端の固定境界に当たって反射する影響が、第2波の減衰状況に影響を及ぼすために、第1波と第2波の低減率は同一にはなっていない。数値波動水路の長さを延長することが上記の問題解決になるが、現在の延長で計算機の容量の限界であり今後の計算法の改良等を行って対応する予定である。

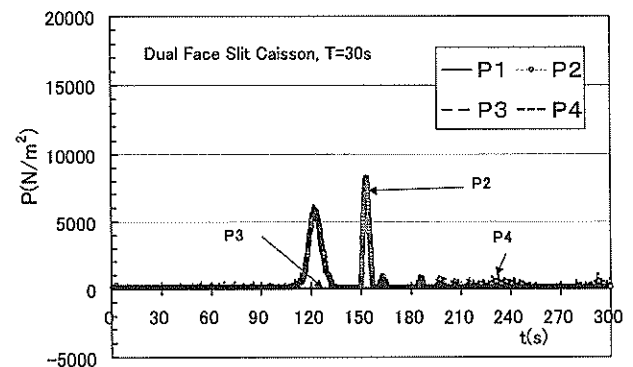
そこで、 $T=60s$ の場合だけでなく、平均化によって過小評価とならないように、 $T=30s$ に関しても、 $X=600m$ および $800m$ での第1波のみの反射波高の平均値を入射波高で除して対象ケースでの反射率として整理した。図-25は、各計算ケースでの反射率を比較したものである。周期 $T=30s$ の場合には、通常の直立壁では、長周期波のエネルギーは大部分が反射され、反射率が0.71となる。片面スリットケーソン壁では長周期波が、やや吸収されるものの、その反射率

は0.65で高く、港内の長周期波を十分に吸収できない。自然海浜では反射率が0.23になり、最も消波効果が高いことが判明した。両面スリットケーソンを用いた消波岸壁は自然海浜と同様の消波性能を有し、反射率は0.36になる。この数値は、現地観測で求められた反射率0.7よりも小さい。計算では多孔体の粒径を一定として、流速が一樣と見なせる場合のエネルギー減衰を含んだ運動方程式を採用し、透水層の幅も現地とは異なるため、反射率が現地観測値とは異なったものと考えられる。

しかしながら、相対的な比較から、両面スリットケーソンの優位性が確認できたので、両面スリットケーソン岸壁を長周期波吸収岸壁として整備すれば、人工海浜等の整備と同様の消波効果を期待できるものと考えられる。周期 $T=60s$ になると、反射率はやや増加し0.58になる。したがって長周期波の周期が長くなれば、より幅の広い透過層を必要とする。自然海浜の場合には、 $T=60s$ の場合でも反射率は0.46で小さく、長周期波のエネルギー軽減には最も適している。すなわち、港湾の計画立案に際しては、できるだけ港内に干潟や自然海浜を残せるようなスペースを確保し、長周期波の吸収ゾーンを設けた方がよい。



(1) 片面スリットケーソンの場合



(2) 両面スリットケーソンの場合

図-26 スリットケーソン遊水部の波圧計算波形

MARS法はケーソン遊水室内での水運動を計算しているので直接遊水室内での波圧を計算できる。ここでは、片面スリットと両面スリットケーソン岸壁の内部壁面に作用する波圧 p (N/m^2) を比較した。前出の図-22に遊水室内計算領域と計測点P1~P4の位置を示す。図-26に $T=30s$ での片面および両面スリット岸壁の測点P1~P4に作用する波圧の波形を示す。波の峰が侵入したときに衝撃的に圧力が発生し、最大値が表れる。衝撃流圧力のピーク値は場所によって異なり、P2で最大となる。この部分は、ケーソンの床板の強度を決めるためにも必要で、MARS法によって設計に必要な内部の波圧解析も可能である。なお、P1とP3の波形は同一で図では重なっている。

図-26に示されるP2の波形からピーク波圧 p_{max} を読み取ると、片面スリットケーソンでは、 $p_{max} = 15500 N/m^2$ 、両面スリットケーソンでは、 $p_{max} = 8500 N/m^2$ となり、両面スリットケーソンは片面スリットケーソンに比べて、同一の長周期波が作用した場合には、最大波圧は0.54倍に軽減される。したがって、長周期波対応岸壁は、従来のものより板厚を薄くし、経済的施工ができる。

4.3 数値計算法の適用性

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ことがわかった。ここでは、模型実験と同一条件で数値解析を行い、計算法の適用性を調べた。計算では、図-22と同様に同一断面で水面か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%で、スリット柱の幅と間隔を、それぞれ5cm, 1.25cmとした。数値波動水路の全長は44m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 $\Delta t=0.2s$ 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。

図-27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岸壁からの反射波形の水位から反射率を決定した。図-28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、P3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4cmおよび4sで一定とし、消波層長は、いずれの場合も200cmである。図の縦軸は水位である。

図-27に示すように、孤立波の計算反射率は、粒径が10mm以上では急速に低下し、 $KR=0.5$ 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、 $d_p=60mm$ で約0.8である。計算では、10mm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60mmの場合の反射率0.45を再現するためには、現在の計算では数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-27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。

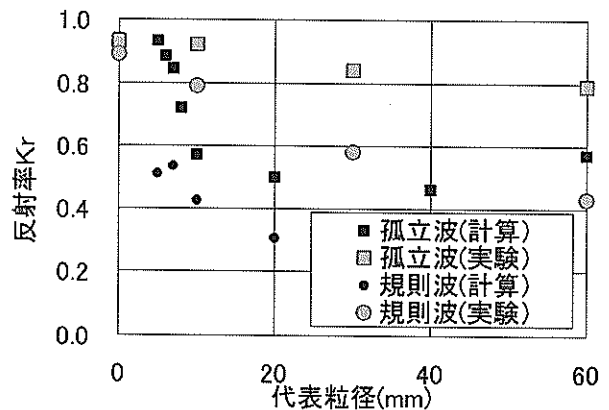


図-27 計算と実験での消波岸壁反射率の比較

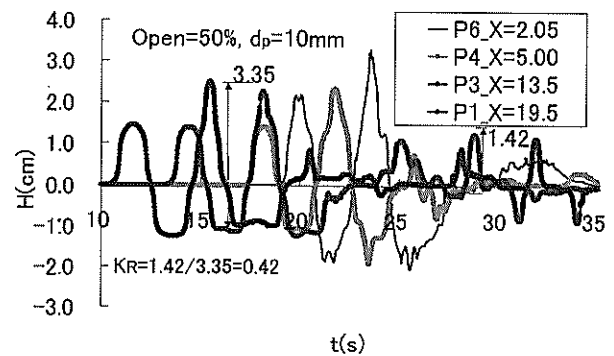


図-28 長周期波対策護岸前面での計算波形

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-29に計算領域を示す。ここでは水深20m、長さ1km、消波層幅80mの長周期波対応岸壁に高さ40cm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、スリット配置線上の格子の平均開口率として評価した。現地では、数十cm

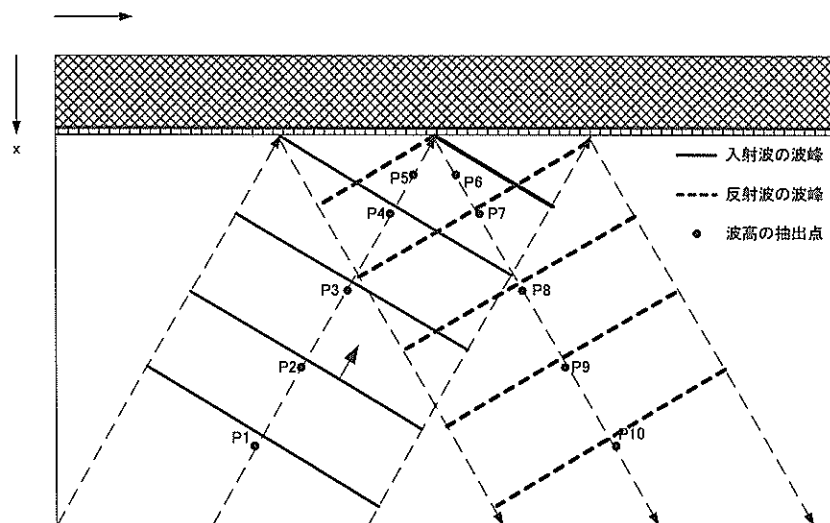


図-29 斜め入射を対象とした平面計算の地形

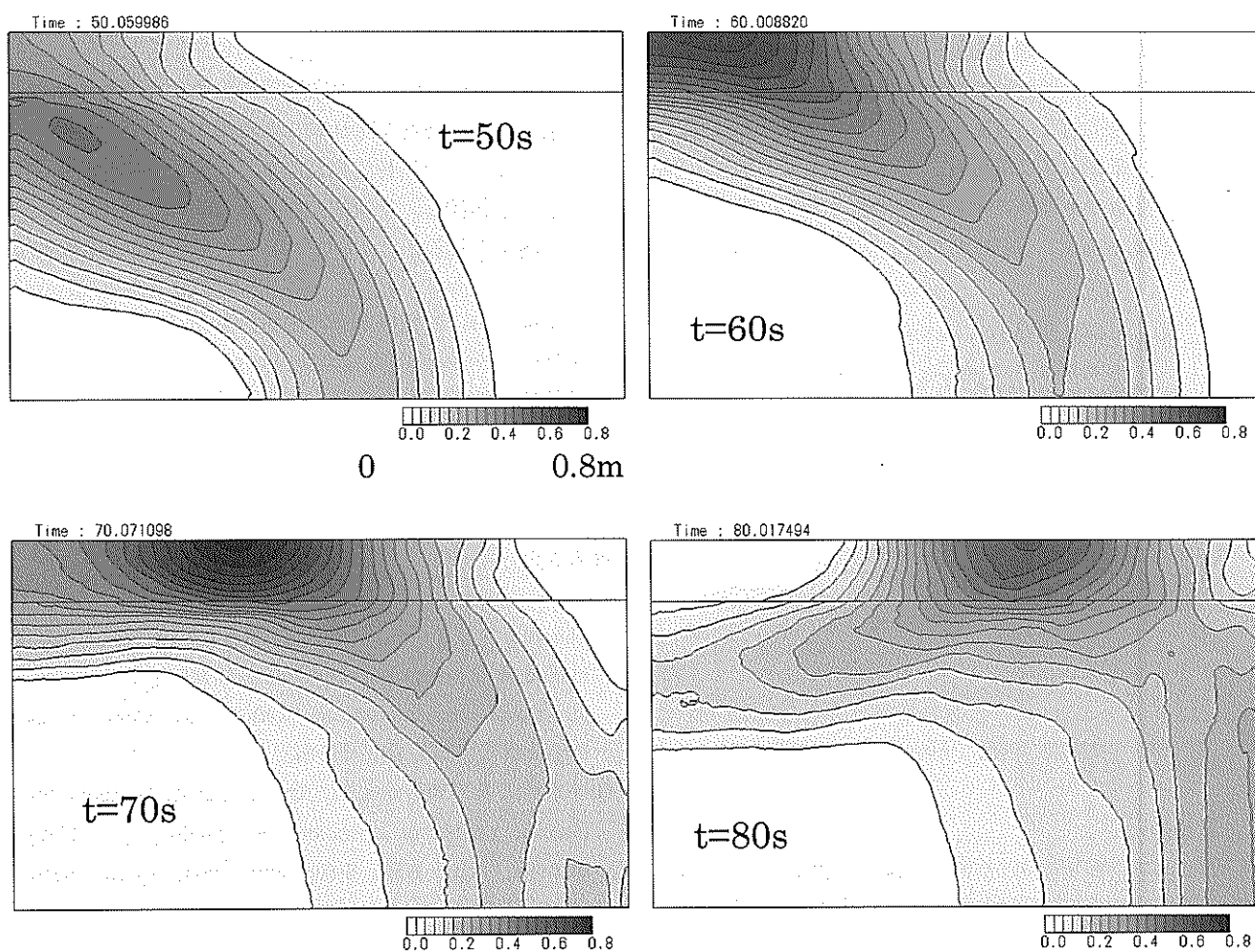


図-30 斜め入射孤立波の長周期波対策護岸近傍での水位分布の変化

以上の異形碎石を消波層として使用するので、修正粒径を10cm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-30に $t=50\sim 80$ sにおける水位の分布を示す。図に示すように $t=50$ sで孤立波の先端が消波層に到達している。 $t=60$ から70sの波形変化を見ると、波形の最も高い部分は、消波層から反射されずに、消波層内を図の右手方向へ移動していることが判る。すなわち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ている。

図-31に護岸前面の代表観測点における観測波形の比較を示す。波のエネルギーの主な移動方向が消波層に沿ったものとなるので、P.8およびP.9では明瞭な反射波のピークが観測できない。判読できるピークの値から、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、 $Kr=0.4$ 程度になり、直入射よりも消波岸壁での反射波低減効果が顕著に現れた。したがって、長周期波対策護岸は、現地において波の多方向性や斜め入射の影響を考慮すると、直入射で検討した模型実験での反射率よりも小さな反射率を有し、より効果的な消波施設となり得ると考えられる。ただし、本計算ケースは限られた条件での試算であり、平面的な模型実験や小型の実規模現地試験で護岸前面での波の特性を詳細に解析する必要がある。

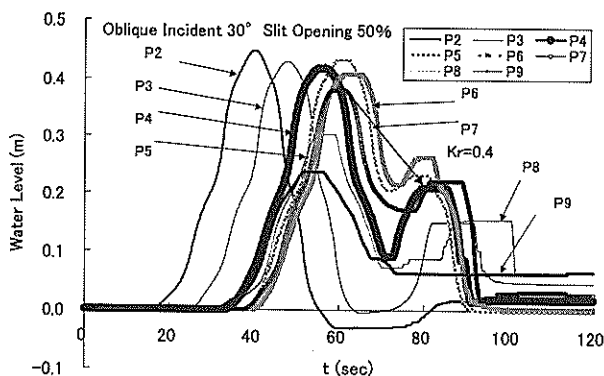


図-31 消波護岸前面で解析された長周期波形

5. まとめ

本研究では、港内における長周期波の対策法として、港内での長周期波の多重反射を防止する長周期波対策護岸を提案し、その効果を数値解析と模型実験で検討した。得られた結論は以下のものである。

- 1) 港奥の適切な場所で長周期波の反射率を0.7程度まで低下させると、港内における長周期波高を低減させる

ことができる。

- 2) 長周期波の反射率を低減できる護岸形式としては、両面スリットケーソンの裏込め材に大型碎石層を用いて透水性を確保した護岸構造が適している。
- 3) 長周期波対策護岸の反射率は、直接流体解析法(MARS法)を適用した数値計算法で予測できる。その値は、砂礫浜海岸における反射率と同程度になった。
- 4) 長周期波対策護岸の反射特性を模型実験で検討したところ、長周期波反射率は、模型の範囲で、裏込め部の消波層の幅および砂礫粒径が大きくなるほど、小さくなった。ケーソンのスリット開口率は、長周期波の反射率には大きく影響しない。
- 5) 模型実験で得られた最小反射率は、規則波で約0.6、孤立波で約0.8になり、長周期波対策護岸は規則波に対してより有効である。
- 6) 同一護岸条件で模型実験結果と数値解析結果を比較したところ、実験反射率が計算反射率より大きくなった。数値計算で実際の護岸反射率を推定する場合には、使用粒径を修正しておく必要がある。
- 7) 幅80mの長周期波対策護岸層に斜めから波が入射する場合の反射特性を平面的に広い領域を計算できるモデルで検討した。長周期波のエネルギーの大部分が消波層中を伝播し、反射率は直入射の場合より小さくなると考えられる。

本研究における模型実験の実施にあたっては、(株)フジタ技術センター永瀬恭一氏にご尽力いただいた。また、数値計算法の開発と実行に関しては(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します。
(2004年6月28日受付)

参考文献

- Hashimoto N., T. Nagai and T. Asai(1994): Extension of maximum entropy principle method(MEP) for estimating directional wave spectrum, 24th Inter., Conf., Coastal Engineering, Vol.1, pp.232-246.
- Hiraishi T., K. Hirayama, H. Kunisu and K. Nagase (2003): Increase of harbor operation rate by long period wave absorber, Long Wave Symposium 2003, Special Session IAHR, pp.91-100.
- Ueda S. and S. Shiraishi(1988):The allowable ship motions for cargo handling at wharves, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.4, pp.3-61.
- 岡安章夫・鈴木康之・花田昌幸(1998):砕波帯内長周期波の

現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 286-290.

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, 港湾技研資料 No. 248, 24p.

笹健児・久保雅義・高橋倫也・白石悟・永井紀彦(2001): 台風時における港内係留船の係留限界予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1351-1355.

白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹(1995): 係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動揺抑制対策, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 941-945.

菅原史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男(1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.

谷本勝利・吉本靖俊(1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 3, pp. 43-77.

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.

日本港湾協会(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 129-131.

日本流体力学会(1998): 流体力学ハンドブック, 丸善, pp. 305-306.

橋本典明・嶺泰宏・永井紀彦・吉松みゆき・三原正裕(2001), 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 246-250.

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, Vol. 35, No. 3, pp. 3-36.

平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松渕 知・藤咲秀可・清水勝義(1997a): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No. 873, 39p.

平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三(1997b): 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 246-250.

平石哲也・河野信二・片山裕之・松島三郎(1998): 鹿島灘における長周期波の出現頻度と荷役稼働率について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 316-320.

平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功(2000): 熊本県竜ヶ岳町における台風9918号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 306-310.

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(2001a): 発生頻度を考慮した長周期波対策工法の選定法, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1356-1360.

平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一(2001b): 南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1411-1415.

平山克也・上原 功・平石哲也(2000): 領域接続法を用いた時間発展型地形変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 196-200.

平山克也(2001): ブシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 26-30.

安田誠宏・平石哲也(2004): 臨海部の複層都市空間におけるMARS法を用いた高精度な浸水解析, 港湾空港技術研究所報告, 第43巻, 第2号, pp. 3-34.

記号表

B	: 碎石による消波層の長さ
d	: 消波層の粒径
d_p	: 平均粒径
d_o	: 代表粒径
F	: 多孔質体に作用する流体力
f	: 波の周波数
H	: 規則波高
H_I	: 入射波高
H_R	: 反射波高
$H_{I/3}$: 有義波高 (風波成分)
$H_{I/3}$: 有義波高 (長周期波成分)
$H_{Ic/3}$: 荷役限界長周期波高
K_R	: 反射率
L	: 作用波の波長
p	: 作用波圧
p_{max}	: 波圧波形のピークでの作用波圧
T	: 規則波周期
$T_{I/3}$: 有義波周期 (風波成分)
$T_{I/3}$: 有義波周期 (長周期波成分)
t	: 時間
u	: 水平流速
v	: 2成分流速計でのy成分流速
X	: 護岸表面からの水平距離
Δt	: 計算時間間隔
δ	: ケーソンスリット開口率
ε	: 多孔質体の空隙率
μ	: 流体粘度
ρ	: 流体密度
θ	: 波向
θ_p	: 主波向

港湾空港技術研究所資料 No. 1093

2004. 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 © (2004) 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。