

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.46 NO.3 September 2007

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 46 卷 第 3 号, 2007年 9 月 (September 2007)

目 次 (CONTENTS)

1. 現地港湾の長周期波対策における透過堤の適用性
.....平石 哲也・平山克也・南靖彦.....3
Applicability of Permeable-type Breakwater for Long Period Wave Countermeasure
.....Tetsuya HIRAIISHI, Katsuya HIRAYAMA, Yasuhiko MINAMI
2. 宮崎住吉海岸におけるビデオ画像を用いた砂浜と沿岸流の長期連続観測
.....鈴木 高二朗.....21
Long Term Observation of Nearshore Topography and Longshore Current in Sumiyoshi Beach using Video Camera
.....Kojiro SUZUKI
3. 内湾の高潮推算への台風ボーガスと局地気象モデルの適用性
.....河合 弘泰・川口 浩二.....43
Applicability of Typhoon Bogus and Mesoscale Model to Simulation of Storm Surges in Bays
.....Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI

現地港湾の長周期波対策における透過堤の適用性

平石 哲也*・平山克也**・南靖彦***

要 旨

長周期波による港湾の係留索の切断事故や荷役障害が各地で報告され、荷役障害を抑止するために、防波堤等による入射長周期波の遮蔽等の対策が検討されている。一方、港内の水質改善や海水交換を促進させるために透過型の防波堤を活用する港湾も増えている。透過型防波堤は波周期が長くなると透過率が增大するため、長周期波対策としては適切ではないと考えられてきた。本研究では、海水交換を図るための透過型防波堤を長周期波対策にも活用するために、最初に防波堤からの透過波を考慮した港内静穏度解析を実施し、透過堤の適用性を調べた。次に、静穏度対策に有効な透過率を有する構造を決めるために、水理模型実験と数値解析を実施して、防波堤構造および堤幅と透過率や反射率の関係を調べた。

非線形波浪変形モデルで港内における長周期波に対する静穏度を調べた結果、非透過堤に比べて、透過率が0.1～0.4の透過堤を設置した場合に、対象港湾内での静穏度が上がることが判った。次に目標とする透過率を満足する防波堤の形式と幅を設定するために、捨石堤および有孔型ケーソン堤について模型実験と直接流体解析法を用いた数値実験で、堤体幅・開口率と透過率との相関を明らかにした。

キーワード：長周期波，透過堤，荷役稼働率，模型実験，直接流体解析法，海水交換

* 海洋・水工部波浪研究室長

〒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:hiraishi@pari.go.jp

** 前 海洋・水工部主任研究官

*** 前 海洋・水工部波浪研究室研究官

Applicability of Permeable-type Breakwater for Long Period Wave Countermeasure

Tetsuya HIRAISHI*

Katsuya HIRAYAMA**

Yasuhiko MINAMI***

Synopsis

Large horizontal motion of moored large vessels and breaks of mooring ropes are mainly induced by long period waves traveling into harbor. Some countermeasures to prevent the cargo handling interrupt due to long period waves are considered in major ports facing Japanese oceans. One of the most popular countermeasures is the construction of offshore breakwaters. Meanwhile it is said that the construction of long vertical-wall type breakwater may cause the reduction of seawater exchange between the outer and inner harbors. A permeable-type breakwater is often considered to keep the function of water exchange.

The wave transmission coefficient of permeable-type breakwaters increases as the wave period increases. Therefore, the permeable-type breakwater has not been expected to be effective against long period waves. In new harbor planning, however, we have to satisfy the both targets of water exchange and prevention of long period waves.

The paper demonstrates the harbor tranquility calculation for long period waves in a model harbor with a permeable breakwater. The calculation for various wave transmission coefficient K_t of long period waves shows that the allowable maximum level of the transmission coefficient exists for the reduction of the agitation due to long period waves. The target permeability for long period waves becomes important to employ a water-exchange breakwater as the countermeasure.

Hydraulic experiments in a wave flume are carried out to investigate the performance of the permeable breakwaters for long swells. In the experiment, the rubble mound breakwater with the width at the sea surface level of 20m and 30m in the prototype and the caisson breakwater with water-exchange openings with 6.3% and 12.6% is studied. A numerical analysis employing the MARS (Multi-Advection Reconstruction Solver) method is also applied to simulate the performance of the breakwater in long swells and long period waves. The physical and numerical model tests demonstrate the transmission coefficient K_t varies for the type and width of breakwaters. The breakwater with the target transmission coefficient suitable to raise the harbor tranquility is proposed.

Key Words: long period waves, long period wave countermeasure, permeable-type breakwater, harbor operation rate, hydraulic experiment, MARS model, NOWT-PARI, water exchange, environmental project

* Head, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445042 Fax : +81-468-413888 e-mail:hiraishi@pari.go.jp

** Former Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

*** Former Member, Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 透過堤を有する港湾の長周期波に対する荷役稼働率	7
2.1 透過率を考慮した計算法	7
2.2 荷役稼働率の計算結果	10
3. 透過堤に関する模型実験	11
3.1 模型実験の内容	11
3.2 透過率の計測結果	13
4. 数値計算による適用性の検討	14
4.1 模型実験によるモデル検証	14
4.2 現地への適用性評価	17
5. あとがき	18
参考文献	18
記号表	19

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クラス的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、沖合防波堤の最適方向への延伸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(沿岸技術研究センター, 2004)。これらの対策は、すでに主要な港湾で検討されており、消波型護岸の反射率計算法も提案されている(平石ら, 2005)

一方、港湾の水質改善や海水交換の促進を目的として、内海の港湾を中心に波の透過をある程度許容する'透過堤'が建設されている(松本ら, 1976)。港内での水産物養殖や発電所の温排水対策として、透過堤の要求は各地で高まるものと予想される。捨石堤やスリットを有する透過型防波堤の波透過率は、一般に波の周期が長くなると増大し、長周期波の抑止効果については、これまで検討されてこなかった。

たとえば、図-1は、港湾の技術基準にも採用されている石積み堤(近藤ら, 1983) (式(1)) および両面にスリットを有するケーソン堤(松本ら, 1976)の透過率実験図表を用いて周期だけを変化させて、長周期波の透過率を計算したものである。提案式は周期数秒程度の風波を対象としており、提案式の適用範囲を超えた周期帯では、透過率は1になってしまい、粒径や堤幅の変化によって長周期波にも効果があるのかどうか明らかではない。

$$K_t = 1 / (1 + k_t \sqrt{H/L}) \quad (1)$$

ここで、 $k_t = 1.26(B/d)^{0.67}$

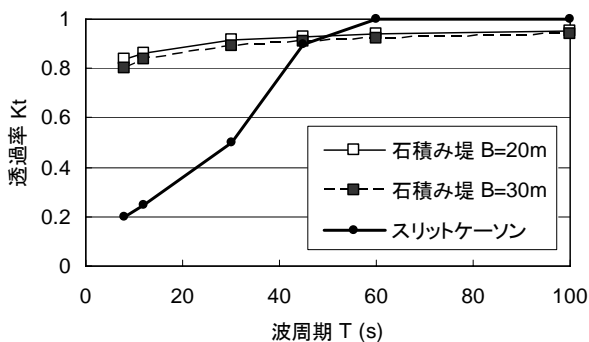


図-1 従来の提案式による透過率計算結果の例
(石積み堤のBは水面での値である)

Bは堤体幅、d:粒径、H:波高、L:波長、 K_t :透過率である。

そこで、本研究では海水交換の維持・改善と長周期波の抑止という相反する目的を満たす防波堤構造を提案するために、まず長周期波の透過率を考慮した港内の荷役稼働率計算を行った。計算では目的とする長周期波に対する荷役稼働率を満たすための必要な透過率が明らかになる。次に、透過堤として代表的な捨石堤および有孔型ケーソンを用いて、模型実験と数値解析で波の周期と透過率・反射率を調べ、現地で適用できる透過堤構造を提案した。すなわち長周期波に対する荷役稼働率を満たすための最大の透過率を求め、それに対応する透過堤の構造を提案することを目的とした。対象とした港湾は、港内に養殖施設が位置し、透過堤の活用が要望されている日本海に面したS港である。

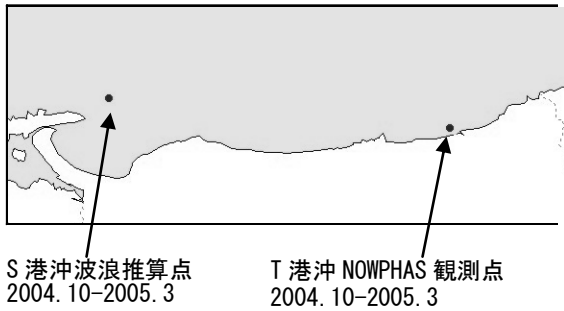
2. 透過堤を有する港湾の長周期波に対する荷役稼働率

2.1 透過率を考慮した計算法

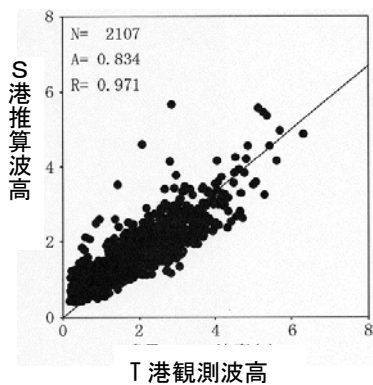
(1) 長周期波の計算法(沿岸技術研究センター, 2004)

本調査では、対象港の港口部までの長周期波を求めるために、S港近傍に位置するT港で観測された長周期波データを用いる。観測期間は2004年10月～2005年3月である。港口部に襲来する長周期波を設定するためには、当該港における観測データを用いるべきであるが、本対象港では観測が実施されていない。そこで、T港における観測データと同時期にS港において推算された値を比較した。ただし、推算した波は風波である。図-2は、観測点および推算点の位置と両者の波高を比較したものである。図-2(b)に示すように、推算波高と観測波高は相関係数 $R=0.971$ で対応しており、両者の相関は高いと考えることができる。したがって、T港における観測風波は、S港における風波と等しい。長周期波は本来、風波の拘束波成分(平石, 1996)として生成されるので、両者の相関も高い。そこで、本研究においては、T港における観測長周期波をS港における沖合長周期波とした。波向は風波の卓越波向であるN(北)で代表させた。

観測期間中に、顕著な船体動揺が生じた2005年2月18日12:00の波スペクトルの長周期波成分を示すと、図-3のようになる。図中の細実線($S(f)$)が観測値で、太実線(Ave.)が0次モーメントを等しくなるように近似した直線型スペクトルである。30～300sのエネルギー密度はほぼ一定で、長周期波の標準スペクトルとしては直線型で近似できる(平石ら, 1998)。スペクトルの0次モーメントの平方根の3.8倍として得られる波高成分は7.9cmである。なお、港内に停泊する大型船の排水トンンは約65,000tで径65mmのナ



(a) 波浪観測および推算点の位置



(b) 風波有義波高の相関

図-2 波浪観測点の位置と波高の相関

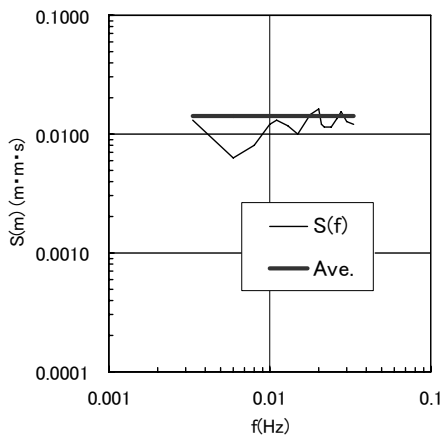


図-3 長周期波のスペクトルと近似形

イロンエイトロープ 8 本で実質係留されるので、次式でサージ運動の固有周期を求めると、約 100s となる(笹ら, 1999). したがって、長周期波の周期範囲 30~300s の中では、ほぼ中間にあたる 100s 程度が最も危険な周期となる。

$$T_s = 2\pi(M_v/K)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 T_s : サージ運動の固有周期、 M_v : 付加質量も含めた船体質量(排水量×1.05)、 K は係留索の合成伸び率である。

長周期波に対する荷役稼働率を計算するための沖合長周期波発生頻度は、2005 年の観測データから表-1 のようにまとめた。

表-1 沖合いの長周期波頻度分布表

長周期波高ランク(cm)	出現回数	出現率(%)
0~10	3601	83.5
11~15	478	11.1
16~20	147	3.4
21~	86	2.0
合計	4312	100.0

浅海域における長周期波の変形計算には、波の屈折・回折・浅水変形・反射を同時に解くことが可能なブシネスク方程式による波高分布計算を実施する。計算は、独立行政法人港湾空港技術研究所のブシネスクモデル(NOWT-PARI)(平山,2002)のプログラムを使用して行った。このブシネスクモデルの基礎方程式は、水深を場所の関数とした修正ブシネスク方程式(Madsen and Sørensen, 1992)である。

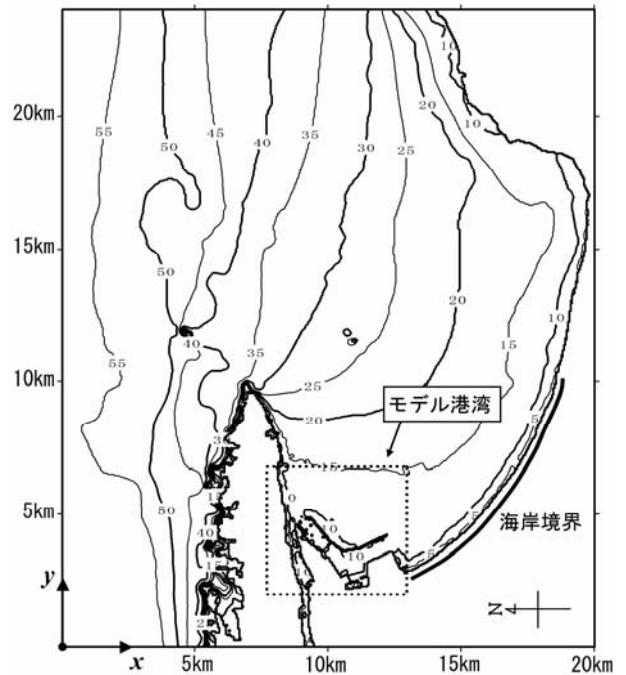


図-4 沖合も含めた長周期波計算領域

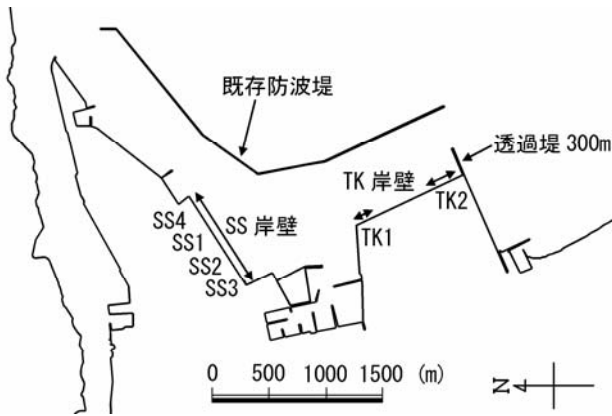


図-5 対象とした港湾と岸壁の地形

図-4 に沖合も含めた全計算領域を示す。図の右側から長周期波が入射し、図の下方に位置する境港へ影響を及ぼす。図-5 は対象港湾の詳細図である。計算格子幅は沖も港内も 50m で一定である。表-2 に計算条件の一覧を示す。

表-2 長周期波変形計算の条件

使用プログラム		非線形分散型長波方程式(NOWT-PARI)
波浪条件	波の種類	一方向不規則波
	波向	N
	入射波高	0.1m
入射波スペクトル		直線型($f=1/300\sim 1/30$)
潮位条件		M.W.L.(D.L.+0.17m)
計算領域		25km(500mesh)×34km(680mesh)
格子幅		50m
作用時間		9000s
有義波算定時間		6000s~9000s
地形条件		基本港湾計画完成時
透過堤条件		長さ:300m 水深:10m 透過率:0.0-0.9

(2) 透過率の設定法

前述した図-5 の南側港口部の水深 10m 地点に長さ 300m の透過型防波堤を計画した。透過型防波堤で透過率を考慮した計算ができるように計算法の境界条件を改良した。NOWT-PARI (平山, 2002) では計算領域にスポンジ層を挿入して反射率の調整を行っている。そこで、透過堤に相当する格子境界においても、波のエネルギーを吸収するスポンジ層を設けて、スポンジ層内のエネルギー吸収強度を変化させて透過率を再現した。ただし、エネルギー吸収強度と透過率の関係は波周期によって変化するので、あらかじめ仮想水路での試験計算で両者の関係を求めておき、目標とする透過率に応じて適切なエネルギー吸収強度を用いた。

ここでは、スポンジ層でのエネルギー減衰式として、次式を用いている。

$$\sigma(x) = \frac{r\sigma_m}{2(\sinh r - r)} \left[\cosh\left(\frac{rx}{F}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

ここで、 F : 吸収帯の幅 (風波の場合は 2~3 波長), r : 吸収帯でのエネルギー減衰を調整する係数で、 $r=3$ を通常設定する。 $\sigma_m = \theta\sqrt{g/h}$ は減衰吸収層の強度を表し、 θ によって強度を変化させることができる。風波の場合には $\theta=1$ を用いている。エネルギー吸収層は境界で反射波が生じることを防ぐために設置されるが、本研究では、計算領域の中に設置して透過壁を評価しなければならず、長周期波を対象としているので、吸収層の幅 F を波長程度にはできない。そこで、一つの計算格子の幅で F を表し、エネルギー吸収係数 $\sigma(x)$ を大きくすることによって透過率を変化させた。以下にエネルギー吸収係数として示しているものは $\sigma(x)$ の値である。

図-6 に仮想の断面水路のイメージを示す。なお図-6 中の H1 および H2 は、水位の抽出ポイントを表しており、それぞれの地点での入射波および透過波の平均波高を H_1 および H_2 で表す。各計算ケースに対する透過率 ($K_T=H_2/H_1$) は、防波堤の反射波が入射波境界に到達して、再度、再反射波が伝播し、計算点に到達する前の 3 波の平均値を用いて算定する。

図-7 は周期 100s について H1 および H2 点での観測波形を示したもので、防波堤からの反射波が到達しない時間で観測された入射波高の平均値と相当する防波堤背後の透過波の波高比から透過率を求めた。同図の場合には透過率は 0.5 になっている。図-8 にエネルギー吸収強度と 2 次元水路での透過率の関係を示す。計算では、格子幅 $\Delta s=50m$ 、防波堤設置位置の水深 10m とした。図には周期 30,60 および 100s において透過率とエネルギー吸収強度を示している。

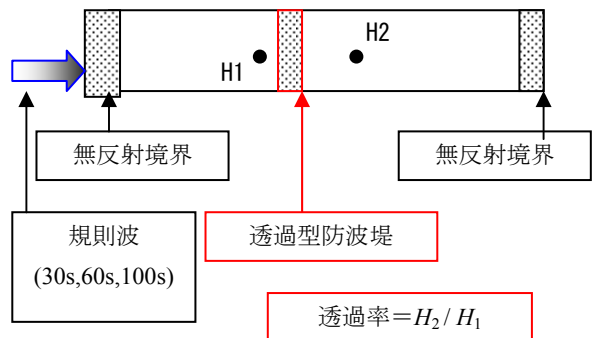


図-6 透過率の計算イメージ図

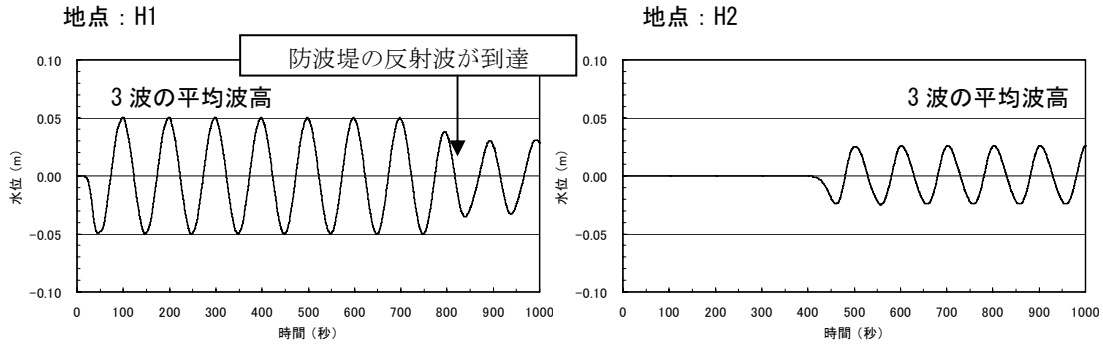


図-7 透過率 0.5 となるケース (エネルギー吸収係数 0.36) における H1, H2 の水位の経時変化図と解析に用いた波形の位置 (入射波周期 100s, 50m 格子)

図-8 に示すように、周期が短く、格子幅が相対的に広い場合には、非線形波浪方程式中の分散項の数値誤差が顕著になり、エネルギー吸収係数が 0 の場合でも透過率が小さくなる。しかし、現地での長周期波の周期範囲である $T=60 \sim 100s$ では、エネルギー吸収係数を変化させることによって、透過率を 0~1.0 まで設定することができ、本計算でも活用できた。

すなわち、本計算ではモデル港に入港する 6 万トンクラスの係留船舶に影響を及ぼす長周期波の数値計算を実施する。6 万トンクラスのサージの固有周期は、100s 前後と概算できるので、数値計算においては、100s 前後の周期に対する計算精度を維持する必要がある。50m 格子で計算した周期 100s の計算結果では、波形の近似精度の問題は発生していない。従って、本調査における長周期波の計算格子間隔は、50m とし、透過型防波堤の所定の透過率 (0.1~0.9) に対するエネルギー吸収係数は、100s に対する値を用いることとする。

この場合に、30s の周期に近い成分は周期 60s および周期 100s よりも透過率が 40% 小さくなってしまふ。ただし、周期 30s の長周期波についても、周期 100s の場合と同等な精度

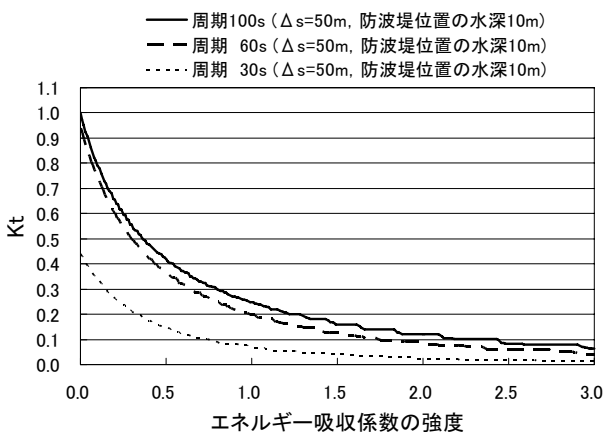


図-8 長周期波の計算透過率の変化

を保つためには、計算格子をより小さくしなければならず、計算時間が長大になる。そこで、前述のように格子幅は 50m で固定した。

2.2 荷役稼働率の計算結果

(1) 荷役稼働率の計算法

荷役稼働率は、対象とする岸壁前面の長周期波高が設定した荷役限界波高を越えない時間の割合として定義される。荷役限界波高は、サージングについて荷役許容動揺量が中程度の船種またはサージング固有周期が 90s 程度の船舶に用いられる有義値で 15cm を用いた (沿岸技術研究センター, 2004)。目標荷役動揺量は技術基準 (日本港湾協会, 1999) にも示されている 97.5% である。対象岸壁は、図-5 の SS1~SS4 および TK1~TK2 である。それぞれの岸壁の延長および水深を表-3 に示す。

表-3 対象とする岸壁の水深

岸壁名(延長)	岸壁水深 (m)
SS4号岸壁(280m)	-14.0
SS1号岸壁 (270m)	-13.0
SS2号岸壁 (185m)	-10.0
SS3号岸壁 (130m)	-7.5
TK岸壁(1) (160m)	-9.0
TK岸壁(2) (260m)	-9.0

なお、SS3 岸壁の端部は矩形の隅角部であり波が収斂し、波高が大きくなる。そのため他の岸壁に比べて荷役稼働率が著しく低い。このような場合には、SS3 岸壁に隣接する護岸を消波構造にして長周期波の反射を軽減することが望ましい。そこで、SS3 岸壁の隣接護岸を‘長周期波対策護岸’ (平石ら, 2003) としたケースについても荷役稼働率を計

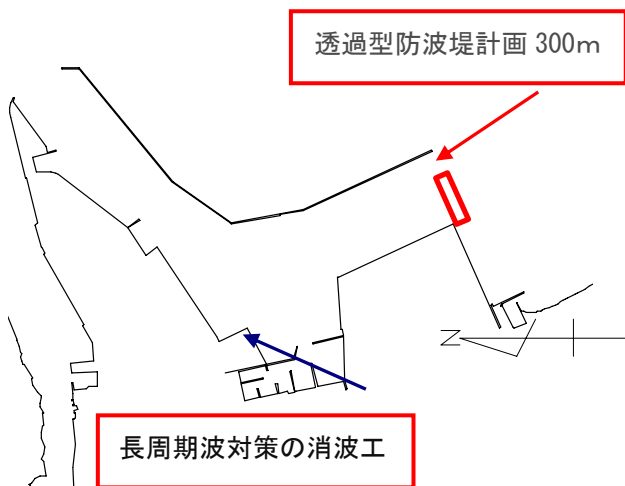


図-9 長周期波対策護岸の位置

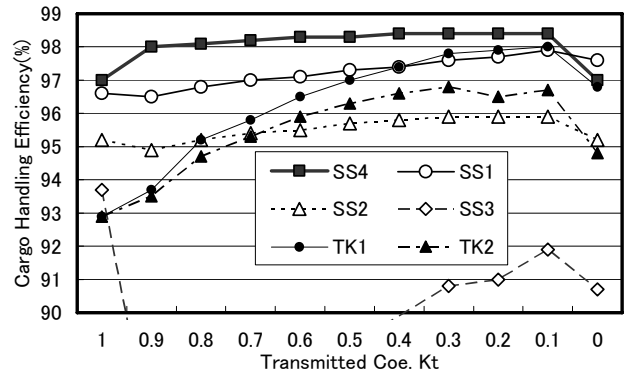
算した。図-9 に長周期波対策護岸の位置を示す。長周期波対策護岸の反射率は0.7とした。また、図-4 で示した周辺の海岸でも反射率0.7を採用した。

(2) 計算の結果

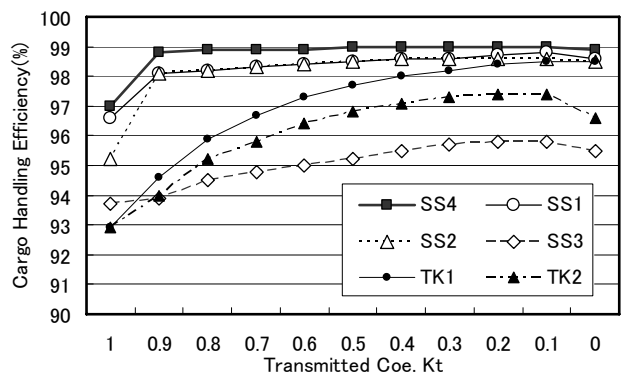
図-10(a)は、対象岸壁での荷役稼働率の計算結果で、横軸に透過率、縦軸に荷役稼働率を示した。 $K_t=1.0$ の場合は対策をしていないので、荷役稼働率はいずれの岸壁でも低い。防波堤を不透過にするほど K_t は低下するので、港内の荷役稼働率は上昇し、対策の効果が上がることが判る。ただし、 $K_t=0$ すなわち完全に不透過な防波堤を設置すると荷役稼働率は低下する。これは、港内で多重反射が生じて、岸壁全面の長周期波高が大きくなるためである。

最も荷役稼働率が向上するのは $K_t=0.1\sim 0.4$ のときで、最適な透過率を有する透過堤を設置することにより荷役稼働率も最適にすることができる。SS3 岸壁で荷役稼働率が90%以下になるのは岸壁が隅角部に位置し、反射波が収斂するためである。最適透過率が設定できれば、次章の考察から、捨石堤を採用した場合の堤幅 B 、あるいはケーソン堤の空隙率(ϕ)を決定でき、構造を決めることができる。捨石堤とケーソン堤の選択は、施工費と施工性からなされる。

図-10(b)は長周期波対策護岸を設置した地形での荷役稼働率の計算結果を示す。図(a)に比較するとSS3 岸壁での稼働率が上昇しており、96%近くまで改善されることがわかる。目標稼働率までは届かないが、対策が無い場合に比べて4%近く向上している。透過率による変化を調べると、不透過の場合に比べて、透過率が0.1~0.3のときに荷役稼働率が高くなっており、この計算ケースにおいても最適な透過率が存在し、不透過堤よりも荷役稼働率を高くできる



(a)水深 10m での基本計画地形および透過堤



(b) 水深 10m での基本計画地形および透過堤+長周期波対策護岸

図-10 透過堤、長周期波対策護岸を有する地形での透過率に対する荷役稼働率の変化

ことがわかる。なお、SS4, SS1, SS2 岸壁は、透過堤位置から離れた港奥に位置しているため、透過率によって荷役稼働率が大きく変化することはない、 K_t が0.9より小さい場合、稼働率はほぼ一定である。これに対して、TK1 およびTK2 岸壁は、透過堤のすぐ背後に直ぐ背後に位置しているため、もともと開口部からの波の作用を受けやすく、防波堤の建設によって荷役稼働率が大きく上昇する。そのため、透過率の変化が稼働率に与える影響が大きくなったと考えられる。

3. 透過堤に関する模型実験

3.1 模型実験の手法

(1) 実験に用いた模型

図-11 に、実験で使用する造波水槽の断面を示す。水槽は、長さ52m×幅1m×高さ1.5m(内空)で、図の右側に

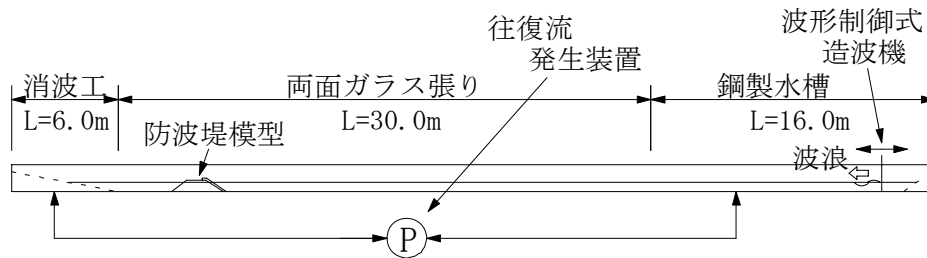


図-11 造波水槽

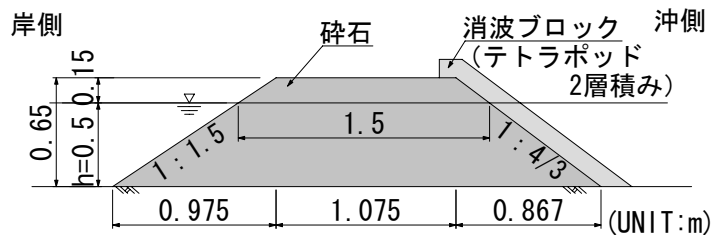


図-12 捨石堤の模型形状

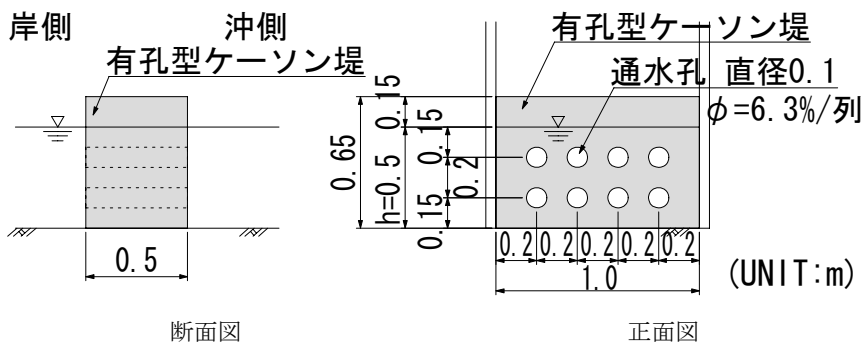


図-13 有孔型ケーソン堤の模型形状

波形制御式造波機が設置されている。左端部には造波機から発生された波が端部で反射しないように、消波工が設置されている。この水槽では最長で10s程度の周期を有する規則波を再現できる。

防波堤模型は、捨石堤と透過型ケーソン堤の2種類とし、実験縮尺は、 $S=1/20$ を標準とした。捨石堤は内部砂礫層を保護するために表層をブロックで被覆した。透過型ケーソンは条件を簡単にするために円形の貫通孔を持つ形状とした。図-12に、捨石堤の堤長 $B=30\text{m}$ (実構造物)の場合の断面図を示す。砕石は実構造物の代表粒径を40cmと仮定して、消波ブロックは、テトラポッド模型を2層被覆形式で積み、天端上段は2列並びとする(写真-1)。

図-13に、透過型ケーソン堤模型の断面および正面図を示すとともに、写真-2に模型の全景を示す。ケーソンの奥行きは実構造物スケールで $B=10\text{m}$ とし、通水孔(直径 $\phi 2\text{m}$)は1列につき4ヶ空けて、上下2列用意した。空隙率は1列で6.3%となり、実験は下段のみおよび上段のみを開放し

空隙率6.3%の場合と、上下段とも開放し12.6%の場合とした、3形状で実施する。

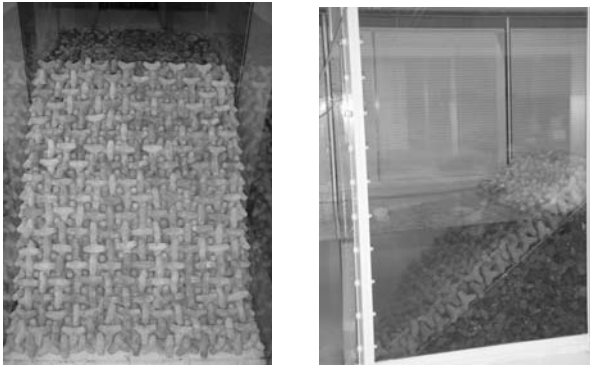
(2) 測定手法

計測器は、図-14に示すように、防波堤の反射率および透過率を計算するために容量式波高計6台(CH2~CH7)、造波された波のモニタ用サーボ式波高計1台(CH1)を配置する。CH2, 3は、入射波分離法(合田ら, 1976)で防波堤の反射率を解析するため、その間隔が波長の $1/4(L/4)$ となる地点にCH3を移動させて計測を行う。測定時間は、波形が安定した時点から120秒間、サンプリング周波数は20Hzとし、同じ条件で3回計測を行う。収録データは、CH2と3, CH4と5, CH6と7をそれぞれ一組として入射波の分離を行い、入射波高と反射波高より防波堤の反射率を算出する。透過率は、CH6, 7より求めた透過波高をCH4, 5より求めた入射波高の比として求める。

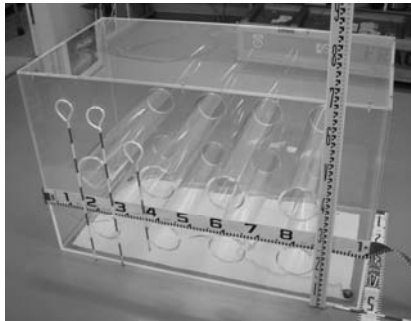
表-4に、実験条件を示す。模型の縮尺は1/20でフルー

表 - 4 実験条件

実験ケース	現地諸元				模型諸元			
	周期T(s)				周期T(s)			
捨て石堤 B=20m	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
捨て石堤 B=30m	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率6.3% (下段)	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率6.3% (上段)	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0
ケーソン堤 空隙率12.6%	8.0	12.0	30.0	45.0	1.8	2.7	6.7	10.0



(a) 被覆ブロック層 (b) 水槽内での設置
写真 - 1 捨て石堤の外観



(a) アクリル模型全景



(b) 水槽内への設置状況 (アクリル模型内のブロックは重りとして使用している)

写真 - 2 透過型ケーソン堤模型全景

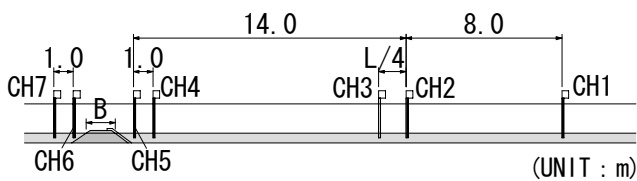


図 - 14 計測器配置図 (捨て石堤)

下の相似則にしたがっている。入射波高はそれぞれの条件で規則波を発生させ、波高計 CH2, 3 で得られた波高データから入反射波分離解析を行って、入射波高が 5cm となるように造波機のスロークを設定した。

3.2 透過率の計測結果

(1) 観測した波形

図-15 は、観測された波形の一例で、捨て石堤 $B=30m$ 、模型値で $T=10s$ (実機換算値 $T=45s$) の実験ケースで再現された長周期波を示す。目標とする造波波高は 5cm (実機換算 1m) である。沖側の 2 点(CH4, CH5)での波高差は小さい。また岸側 2 点(CH6, CH7)での波高は 1cm 以下に小さくなっており、透過堤による波高低減効果が観測できた。なお、造波した直後は、水槽内の波高分布が一定ではないので、図に示すように、波高が時間的にも変化しない 100s 後から解析を実施した。

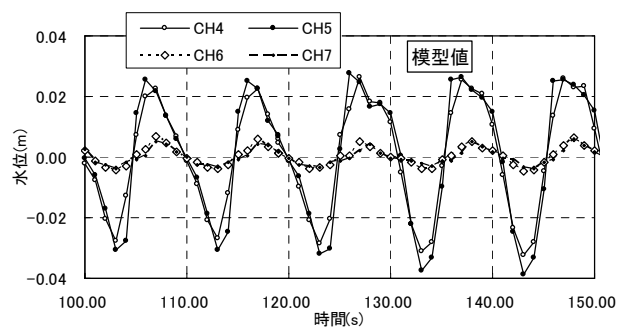


図-15 観測波形の一例

(2) 透過率と反射率の整理

表-5 は、反射率および透過率の観測値を整理したものである。また図-16 および図-17 に周期を変化させた場合の実験反射率および透過率を示す。ここで、反射率は実験水槽内で観測されたものであり、実験水槽終端の側壁からの

表-5 実験の結果一覧

(1) 反射率

ch2, 3					
case	現地諸元 T(s)	8.0	12.0	30.0	45.0
	模型諸元 T(s)	1.8	2.7	6.7	10.0
捨て石堤 B=20m		0.379	0.566	0.746	0.775
捨て石堤 B=30m		0.368	0.532	0.725	0.719
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(下段)		1.000	0.946	0.709	0.727
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(上段)		0.885	0.916	0.715	0.710
透過型ケーソン堤 空隙率12.6%		0.772	0.887	0.533	0.619

ch4, 5					
case	現地諸元 T(s)	8.0	12.0	30.0	45.0
	模型諸元 T(s)	1.8	2.7	6.7	10.0
捨て石堤 B=20m		0.422	0.580	0.695	0.777
捨て石堤 B=30m		0.428	0.545	0.684	0.730
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(下段)		0.970	0.940	0.829	0.743
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(上段)		0.951	0.932	0.816	0.745
透過型ケーソン堤 空隙率12.6%		0.904	0.901	0.651	0.624

(2) 透過率

case	現地諸元 T(s)	8.0	12.0	30.0	45.0
	模型諸元 T(s)	1.8	2.7	6.7	10.0
捨て石堤 B=20m		0.111	0.146	0.163	0.279
捨て石堤 B=30m		0.084	0.136	0.149	0.206
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(下段)		0.082	0.163	0.190	0.440
透過型ケーソン堤 空隙率6.3%(上段)		0.104	0.169	0.217	0.447
透過型ケーソン堤 空隙率12.6%		0.178	0.297	0.378	0.636

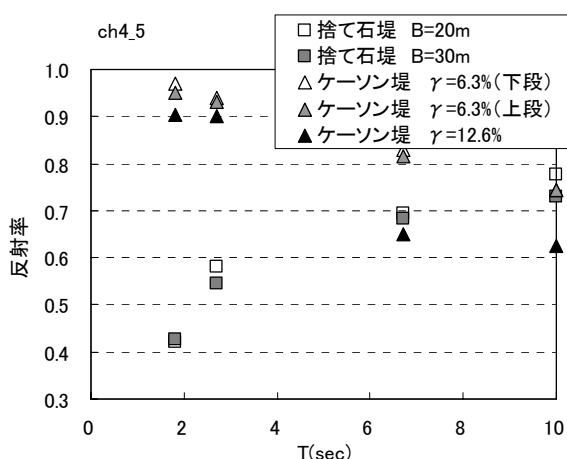


図-16 実験における反射率の変化

(T=10s の△は記号が重なって印字されていない)

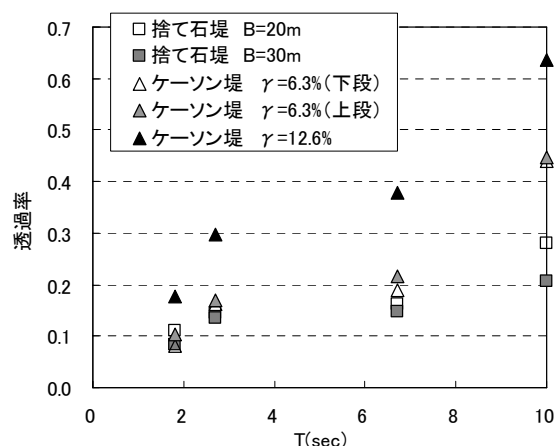


図-17 実験による透過率の変化

反射も含まれている。現地でも長周期波の場合には、港奥部の反射された長周期波も含まれた反射波が形成されるので、防波堤のみの反射率とは定義が異なっている。堤内外の水位は平均して同一になるように管路でつながっている。

波の周期 T (模型での値) が長くなると、捨て石堤では反射率が大きくなる。これは、長周期波のエネルギーが捨て石層内で減衰せずに、水槽終端で反射して港外へ戻るためと考えられる。有孔型ケーソン堤では、周期が長くなると反射率は小さくなる。これは、一度流入した水が、通水部が小さいため、港外へ戻れなくなるためと考える。

4. 数値計算による適用性の検討

4.1 模型実験によるモデル検証

(1) 数値解析手法

実験周期より長い長周期波の透過率および反射率を推定するために用いた数値解析手法は、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。この手法は、これまでに長周期波対策護岸の性能検証で活用され(平石ら, 2005), 津波や高潮の臨海部への氾濫解析では、模型実験や現地痕跡高との検証が行われた(Hiraishi and Yasuda, 2006)。本計算の捨て石堤においては、砂礫層内の圧力損失を次式で示す Dupuit-Forchheimer 則で計算した。捨て石堤の場合には護岸の延長方向は一樣であるので、岸沖の2次元モデルとした。透過型ケーソン堤の場合には、1つの通水管とそれを含むケーソン堤断面のみを抽出した3次元モデルを構築して計算を行った。水深はすべてのケースで 10m として、約 800m の長水路を想定した。

波浪は、構造物で反射後、沖側の境界に到達した反射波

が、造波境界で再び反射されると波形が複雑となるため、沖側に波浪のエネルギーを吸収するスポンジ層を設定して、その前面に $x=790\text{m}$ 造波ソースを置いた。

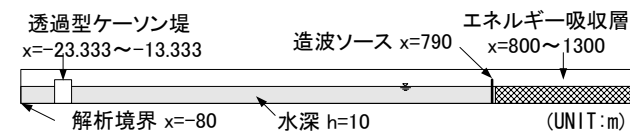
Dupuit-Forchheimer 則は次のように表される。

$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{u}{g} (\alpha + \beta |u|) \quad (4)$$

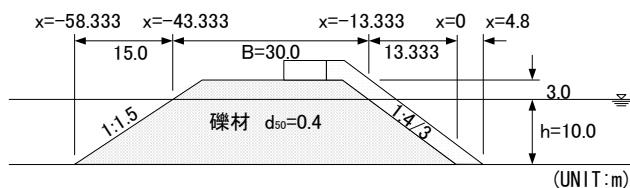
$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^2}{\lambda^3} \frac{\nu}{d_0^2} \quad (5)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d_0} \quad (6)$$

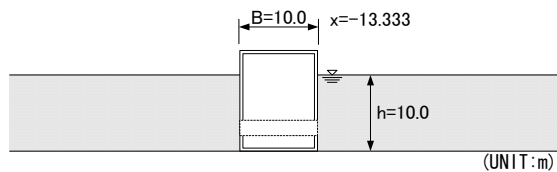
ここで、 $\Delta h/l$: 圧力損失水頭、 u : 層内流速、 λ : 透水層の空隙率、 d_0 : 中央粒径、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数、 α_0 および β_0 : 材料で決まる係数である。Dupuit-Forchheimer 則の係数については、捨石堤表層の波消しブロックに関しては、近藤・竹田(1983)を参考に乱積の値として $\alpha_0=2100$ 、 $\beta_0=2.2$ とした。また、代表的な波消しブロックのカタログデータより $\lambda=0.5$ とし、代表径は体積 V より代表径を $\sqrt[3]{V}$ とし算出した。捨石材の α_0 、 β_0 ならびに砂礫層の空隙率 (λ) は、 $\alpha_0=2400$ 、 $\beta_0=3.6$ 、 $\lambda=0.40$ とした(平石(2005))。数値計



(a) 計算領域の全体図



(b) 捨石堤の計算モデル



(c) 有孔ケーソン堤の計算モデル

図-18 数値計算での対象地形と透過堤の模式図

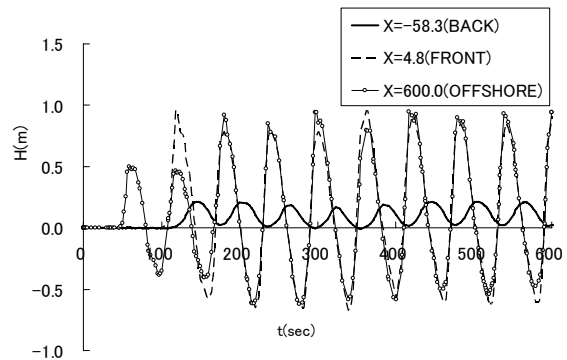


図-19 数値計算で得た波形の例(捨石堤($B=30\text{m}$), $T=60\text{s}$) (透過堤前面(FRONT), 直背後(BACK)および $x=600\text{m}$ での沖波(OFFSHORE)での波形を示す)

算では、実験周期に加えて $T=60$ および 100s を計算した。規則波の波高 H は 1m で一定とした。

図-18 は、数値解析に用いた水路および透過堤の模式で、岸沖方向では、外洋部分で 2m 、構造物周辺は 1m 、鉛直ならびに横断方向は $12\sim 25\text{cm}$ である。実験では透過堤前面と直背後の水位差は、両者を繋いだ管路の自然流下で調整していたが、計算では別途管路を設けることが困難であり、計算中に透過堤背後の水位が高くなる場合があった。特に、有孔型ケーソン堤で周期が長くなると、背後の水位が高くなるために計算が不安定になった。不安定になったケースでは、1.5 倍程度に背後の解析境界を延長して、できるだけ水位差が生じないように工夫した。

図-19 は、数値解析で得た代表点の波形である。実験の手法と同様に、波高計配置点と一致する計算点での波形から入射反射分離計算を行い、 K_r および K_t を推定した。

(2) 解析結果

図-19 に示した計算波形を用いて、実験と同様に 2 点間の水位の変化を出力し、入射波分離計算から実験解析と同じ手法で反射率および透過率を求めた。

その他の周期も含めた解析波形の傾向をまとめる；

- ・周期 $T=8\text{s}$ では、捨石堤の岸側法面先端部分 $x=-58.333\text{m}$ 、捨石堤沖側消波ブロックの先端の $x=4.8\text{m}$ および $x=200\text{m}$ で入射波分離計算を行った。 $t=105\text{s}$ に $x=4.8\text{m}$ に到達した波浪はすぐに透過して、 $x=-58.333\text{m}$ の測点には、 $t=110\text{s}$ には到達している。 $x=200\text{m}$ には $t=85\text{s}$ に到達して $t=130\text{s}$ には反射波も到達している、 $t=170\text{s}$ 以降は定常状態に達している。この測点と 25m 岸側の $x=175\text{m}$ のデータを用いて、入射波分離計算を行った。このときの解析に用いたデータの時間間隔は $\Delta t=0.1\text{s}$ でデータの個数は $n=2048$ 個である。この場合の反射率 $K_r=0.241$ で礫によりエネルギーが十分減

衰されていることがわかった。また、透過波の波高 $H_t=0.0098\text{m}$ から、透過率を計算すると $K_t=0.0118$ となった。

・周期 $T=12\text{s}$ では、 $x=175, 200\text{m}$ の波形から $\Delta t=0.1\text{s}$, $n=2048$ として反射率計算を行った結果、入射波高 $H_i=0.985$, 反射波高 $H_r=0.4295$ から、反射率 $K_r=0.436$ であり、透過波高 $H_t=0.0295$ から透過率は $K_t=0.0677$ となった。

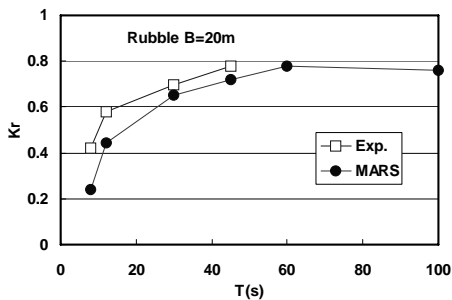
・周期 $T=30\text{s}$ では、 $x=200\text{m}$ の波形には $t=120\text{s}$ 以降、反射波が重なって波峰が重なっている。 $x=150, 200\text{m}$ の波形から $\Delta t=0.1\text{s}$, $n=2048$ として反射率計算を行った結果、入射波高 $H_i=0.9057\text{m}$, 反射波高 $H_r=0.5723\text{m}$ から、反射率 $K_r=0.636$ であり、透過波高 $H_t=0.05453$ から透過率は $K_t=0.0602$ を得た。

・ $T=45\text{s}$ の場合には、 $x=150, 200\text{m}$ の波形から $\Delta t=0.1\text{s}$, $n=2048$ として反射率計算を行った結果、入射波高 $H_i=0.949\text{m}$, 反射波高 $H_r=0.709\text{m}$ から、反射率 $K_r=0.747$ であり、透過波高 $H_t=0.1571$ から透過率は $K_t=0.166$ を求めた。

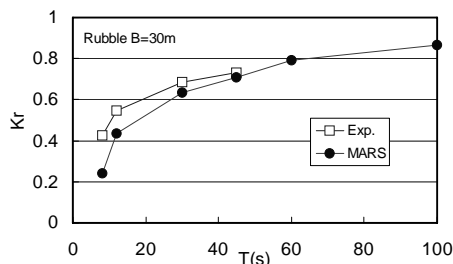
周期 $T=60\text{s}$ 以上については、検証された計算モデルを用いて評価することになる。

(3) 実験および数値計算結果の比較

実験で求めた各種透過堤の K_r および K_t , さらに数値計算で得た同様の結果をまとめて示す。図-20 に捨石堤の反射率に関する実験値(Exp)と計算値(MARS)の比較を示す。図-21 は、有孔型ケーソン堤の反射率について実験結果と

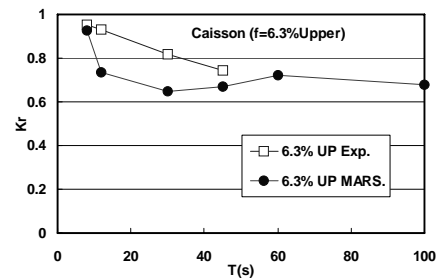


(a) 堤幅 $B=20\text{m}$

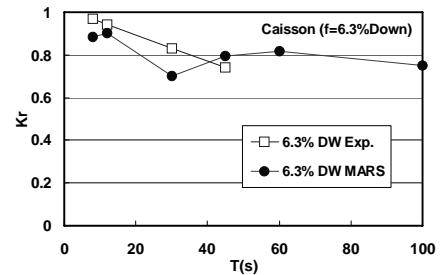


(b) 堤幅 $B=30\text{m}$

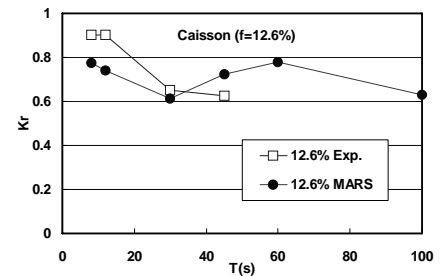
図-20 捨石堤の反射率



(a) 上段開放



(b) 下段開放



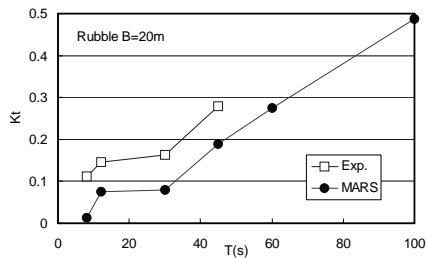
(c) 上下段開放

図-21 有孔型ケーソン堤の反射率

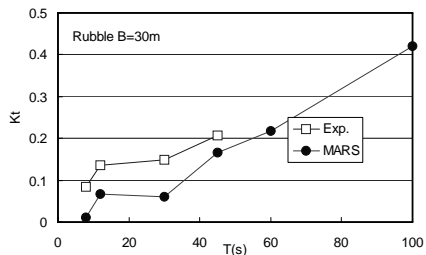
計算結果を比較したものである。捨石堤に関しては、奥行き $B=30\text{m}$, 20m ともに $T=8$ から 30s の短周期の部分で解析値が小さい傾向がみられるが、両者はよく対応していることがわかる。透過型ケーソン堤では開口率 $\phi=6.3\%$ の場合には、周期 $T=30\text{s}$ において実験値より反射率が低くなっているが、そのほかの場合には良好な一致が見られる。開口率 $\phi=12.6\%$ の場合には、周期に係わらず $K_r=0.68\sim 0.8$ の反射率となっているが、 $T=100\text{s}$ の長周期では $K_r=0.63$ まで低下している。

図-22 および図-23 に解析ケース毎に透過率を比較して示す。捨石堤に関しては、奥行き $B=30\text{m}$, 20m ともにすべての周期で、解析値がやや小さい傾向がみられる。しかし、周期が長くなると透過率が大きくなる様子はよく再現されており、数値解析モデルの精度は高い。

透過型ケーソン堤では、周期 $T=8\text{s}$ の場合に良好に一致しているが、そのほかのケースでは、空隙率によって一致

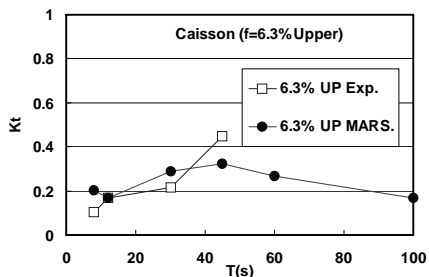


(a) B=20m

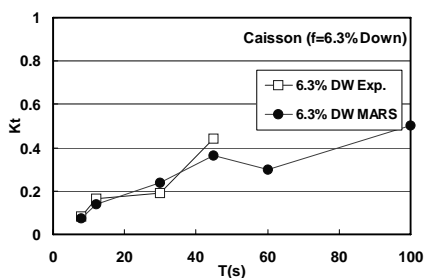


(b) B=30m

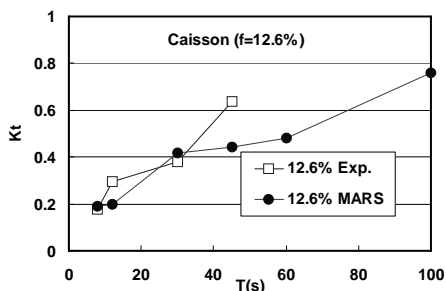
図-22 捨石堤における透過率の比較



(a) 上段開放



(b) 下段開放



(c) 上下段開放

図-23 有孔型ケーソン堤の透過率の比較

度が異なる。そこで、計算波形を観察すると、計算初期には波が透過しているが、計算時間が経過すると背後域の水位が上昇して波が透過しにくくなるケースが現れた。この場合には、共振が見られた場合も含めて、前述したように背後水域を長くして波高解析を行った。結果を見ると、上下ともに通水孔を有する場合や、下段のみに通水孔を有する場合には、ほぼ実験値の変化傾向と一致し、数値解析結果から長周期波の透過率を推定できる。通水孔が上段にある場合には、周期が長くなると透過率が小さくなるが、これは透過した海水によるケーソン背後の水域の平均水位が上昇し、それによる変動水圧が上方の通水孔からの海水侵入を妨げるためと考えられる。

本節での実験値と計算値の比較から、捨石堤の場合には、周期 45s 以下での計算値と実験値はよく一致し、有孔型ケーソン堤でも、両者はほぼ一致したと言える。したがって数値解析法の妥当性が検証でき、実験範囲より長い周期では数値解析で透過率を評価できた。

4.2 現地への適用性評価

モデル港湾では、100s の長周期波が最も荷役に影響を与える。2. の検討で最適透過率は $K_t=0.1\sim 0.4$ であると判断できる。一方、3. および 4. における構造毎の検討では、数値解析によって、 $T=100s$ に対する透過率が計算できることが判明した。そこで、目標とする透過率を設計で決めると、必要な堤体幅や空隙率が設定可能になる。

捨石堤の場合には、 $B=20$ および $30m$ について透過率が求められるので、補正計算等で必要な堤体幅を計算すればよい。

透過型ケーソン堤の場合には、上段だけを通水させた計算が安定せずに、堤体背後の水域での水位によって透過率が変化していた。ただし、下段を通水させた場合は、ほぼ解析結果によって長周期波の透過率が推定できるので、概略値であるが、有孔ケーソン堤について、空隙率と透過率の関係を $T=100s$ で整理した。

図-24 は、近似的に有孔型ケーソンの空隙率と透過率の関係を示したものである。図の曲線の作成に当たっては、実験と数値計算で求めた空隙率 6.3% (下段開放) および 12.6% の透過率と 0 点を (図中に黒丸で示した 3 点) を通過する 2 次近似曲線をあてはめた。図から、たとえば透過率が 0.2 の場合には、空隙率 2.5% 程度が必要であることが読みとれる。ただし、図は限られた計算結果での近似であり、設計にあたっては、実際の構造形式に対して、引き続き詳細な検討が必要と考える。また、通水部の形状に関しても施工上の問題がないように設計する必要がある。

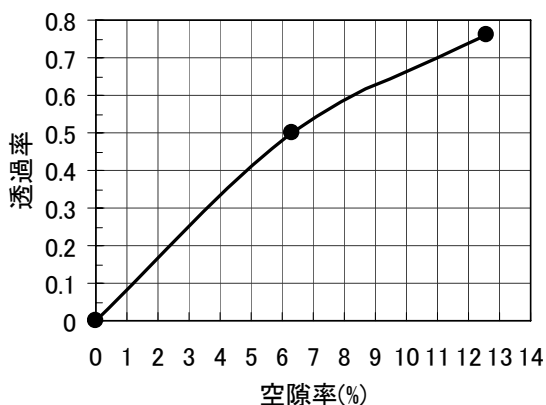


図-24 有孔型ケーソン空隙率と透過率の関係

5. あとがき

本研究で判明したことをまとめる。

- 1) NOWT-PARI のスポンジ層強度を変化させて、透過堤を設置した場合の長周期波高の変化を計算できる手法を提案した。
- 2) スポンジ層のエネルギー吸収強度と透過率の関係は、波周期によって変化し、本研究では周期 100s の長周期波に対する透過率を採用した。
- 3) 荷役稼働率を計算すると、非透過堤よりも透過堤を採用したケースの稼働率が上昇し、港内での長周期波の増幅を抑制できる効果が確認できた。
- 4) 最適な透過率が存在し、本モデル港湾の場合には透過率 $K_t=0.1\sim 0.4$ が最適値であった。
- 5) 荷役障害が生じている岸壁近傍の護岸を長周期波消波護岸に改良することで、港内の荷役稼働率をより上昇させることができる。
- 6) 模型実験によって、捨石堤と有孔型ケーソン堤の反射率を測定すると、捨石堤の場合には、波周期が長くなると、反射率は上昇した。一方、有孔型ケーソン堤の場合には周期が長くなると、反射率は減少した。
- 7) 波透過率は、捨石堤の堤幅が小さくなるほど、有孔型ケーソン堤の空隙率が大きくなるほど、大きくなる。有孔型ケーソン堤の通水管の位置は大きな影響を有しない。
- 8) MARS 法による数値解析で、透過堤の反射率を求めると、周期 $T=8\sim 45s$ の範囲で、捨石堤および有孔型ケーソン堤ともに、数値計算結果は実験結果とよく一致した。
- 9) 数値解析による透過率は、捨石堤に関しては、実験値

とほぼ一致した。有孔型ケーソン堤の場合には、下段に通水部を設けたときと、上下段に通水部を設けたときは、よく一致した。

- 10) 通水部が上段のみに有る場合には、堤体背後で波透過後に水位が上昇したり、振動する影響が生じ、周期が長くなると計算が不安定になり、今後の数値計算法のさらなる改良が必要であることが判った。
- 11) 数値解析によって、最適透過率を実現するための透過堤の構造や規模を選定することが可能となった。

本研究では、透過堤を対象にした長周期波の静穏度計算法を提案し、その適用性を示したもので、現地における事業に直接関係したものではない。また、透過堤の効果は設置位置と港形に大きく依存している。ただし、少なくとも、本研究で対象としたような細長い港湾形状で、港口部に長周期波対策を目的として防波堤を設置する場合には、透過堤構造とした方が港内の荷役稼働率も上昇する可能性があり、最適透過率に対する検討をした方がよい。

また、港湾が直立の防波堤と護岸で囲まれ、港内における長周期波の多重反射が懸念される場合にも、防波堤の一部を透過堤構造に変更することによって、長周期波に対する荷役稼働率を向上させることができる。そのような場合には、本研究でまとめた調査手法を活用すると、定量的な検討が可能になる。

本研究で用いた流体直接解析法の計算においては、(株)フジタ技術センター永瀬恭一氏のご支援を受けた。また、モデル港湾の地形や波浪条件については、国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所の厚意により波浪観測資料を提供していただいた。関係の皆様深く感謝いたします。

(2007年6月 受付)

参考文献

- 沿岸技術研究センター(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.
- 笹健児・白石悟・榎原繁樹(1999)：係留船舶の長周期動揺の各種計算法による再現性に関する比較検討，港湾技研資料，No. 931, 80p.
- 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.
- 近藤俊郎・竹田英章(1983)：消波構造物，森北出版，pp.110-111.
- 日本港湾協会(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説，

下巻, 日本港湾協会, pp.582-586.

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.

平石哲也・河野信二・片山裕之・松島三郎(1998): 鹿島港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・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.

平石哲也(2005): 長周期波対策護岸の最適化に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, 第44巻, 第1号, pp.23-41.

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, 港湾空港技術研究所資料, No.1036, 162p.

松本輝寿・永井康平・武智雅敏(1976): 直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究, 第23回海岸工学講演会講演集, pp.112-116.

Hiraishi T. and Y. Yasuda (2006): Numerical simulation of tsunami inundation in urban areas, J. Disaster Research, Vol.1, No.1, pp.148-156.

Madsen, Per A. and Ole R. Sørensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part2, A slowly-varying bathymetry, Coastal Engi., 18, pp.183-204.

Δt	: 計算時間間隔
δ	: ケーソン空隙率
ν	: 動粘性係数
ρ	: 流体密度
θ	: スポンジ層強度
λ	: 透水層の空隙率

記号表

B	: 捨石堤の堤幅 (水面での幅)
d	: 捨石堤粒径
d_0	: 代表粒径
F	: スポンジ層の幅
f	: 波の周波数
H	: 規則波高
H_1	: 入射波高
H_R	: 反射波高
$H_{1/3}$: 有義波高
K_r	: 反射率
K_t	: 透過率
T	: 規則波周期
$T_{1/3}$: 有義波周期
t	: 時間
u	: 水平流速
v	: 2成分流速計でのy成分流速
x	: 透過堤のり先からの水平距離
α_0	: 多孔質体の層流抵抗係数
β_0	: 多孔質体の乱流抵抗係数