

# 長周期波対策構造物の高度化に関する研究

## On the Study of Practical Application of Long-Period Wave Absorption Structure

中嶋さやか<sup>1</sup>・大島香織<sup>2</sup>・安野浩一郎<sup>3</sup>・水流正人<sup>4</sup>  
杉田繁樹<sup>5</sup>・西畑 剛<sup>6</sup>・関本恒浩<sup>7</sup>・平石哲也<sup>8</sup>

Sayaka NAKAJIMA, Kaori OHSHIMA, Kouichirou ANNO, Masahito TSURU  
Shigeki SUGITA, Takeshi NISHIHATA, Tsunehiro SEKIMOTO and Tetsuya HIRAISHI

We have developed the long-period wave absorption structure by the experimental studies. On planning to apply it to actual fields, we propose the advanced type structure adding to upright wave absorbing blocks to dissipate not only long-period waves but also short-period one. The hydraulic performance such as reflection rates is verified through experiments. Furthermore, we reproduce the hydraulic performance of the structure with the numerical analysis based on the non-linear shallow water theory and demonstrate that it is useful for practical design of the structures.

### 1. はじめに

近年、港湾の係留船舶の動揺による荷役稼働率の低下、係留索の破断事故等が発生させる支配的要因として長周期波が注目されており、その対策が課題となっている。

長周期波対策として、これまで平石・永瀬（2003）や池野ら（2004）がレキ材を用いた構造物を提案している。しかし、入射波の波長が長ければ、必要とする構造物幅も比例して増大するため、港湾での空間確保に課題があった。一方、大島ら（2006）は、導水板と遊水室からなる渦消波型構造物を提案している。本構造物は、導水板前背面に生じた水位差が渦を励起させることで長周期波の消波を可能とし、前者と比べて構造物幅を必要としない。これまでその消波特性や構造物の最適形状について検討されてきたものの、そのほとんどが規則波に対する基本的な検討であり、実海域を想定した検討は十分とは言えなかった。

本研究では、渦消波型構造物の実海域への適応性について検討するとともに、実務設計に向けた消波性能の簡便な評価手法として、非線形長波方程式を用いた数値計算の有効性について検討した。

### 2. 水理模型実験

#### (1) 実験概要

実験は、無反射造波装置を有する2次元水槽（長さ

1	正会員	修(農)	五洋建設(株)	技術研究所
2	正会員	博(工)	五洋建設(株)	
3	正会員		五洋建設(株)	技術研究所
4	正会員		五洋建設(株)	本社土木設計部
5	正会員	修(工)	五洋建設(株)	本社土木設計部
6	正会員	修(工)	五洋建設(株)	技術研究所
7	フェロー	博(工)	五洋建設(株)	技術研究所
8	正会員	工博	(独)港湾空港技術研究所	海洋・水工部

50m、幅0.6m、深さ1.2m)に、図-1に示すアクリル製の渦消波型構造物模型と容量式波高計13本を設置し、1/50縮尺で行った。図-2に波高計設置位置を示す。反射率は、入射分離推定法（例えば合田，1976）を用いて算出した。実験方法の詳細については、大島ら（2006）と同様であり、詳しくはそちらを参照されたい。

なお、本文中の数値は全て現地スケールで表記する。

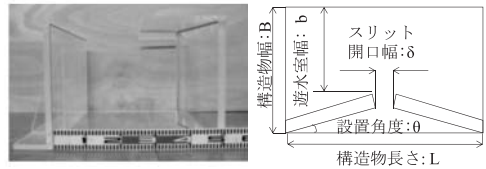


図-1 渦消波型構造物の形状

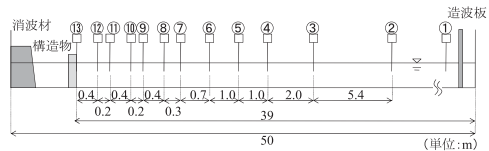


図-2 2次元水槽および波高計設置位置

#### (2) 実験内容

##### a) 合成波に対する消波性能

実海域のような長周期波と短周期波が共存した条件では、導水板前面で短周期波が長周期波と干渉し、消波機構であるスリット開口部からの強い流れが抑制される可能性が考えられる。そこで、短周期波と長周期波の規則波を重ね合わせた合成波を造波させ、その際の消波性能について確認した。なお、反射率は短周期および長周期成分ごとに算出した。表-1に実験条件を示す。

表-1 実験条件

水深 h(m)	構造物条件		入射波条件	
	構造物幅 B(m)	スリット 開口幅 $\delta$ (m)	波高 H(m)	周期T(s)
10	25	0.75	0.5	5, 10
			0.25	30, 60, 90

**b) 消波性能の向上**

本構造物は、2枚の導水板から形成されるスリット開口幅が狭いために、短周期波は導水板によってほぼすべて反射し、長周期波はほぼすべて透過する（例えば角野・小田, 1986）。したがって、導水板前面に短周期波消波構造物を設置すれば、長周期波に対する消波性能を保持し、分離された短周期波も消波することが可能であると考へた。本研究では直立消波ブロックを用いた構造物を提案し、直立消波ブロックによる乱れなどが長周期波の消波性能に及ぼす影響について確認した。実験は、図-3に示すアクリル製の導水板で構築した基本型、直立消波ブロックを用いて導水板を構築した直立消波型および直立消波ブロックの通常の設置形式（以下、直立消波堤と称す）の3つの構造形式で行った。入射波はすべて規則波とし、表-2に実験条件を示す。なお、用いた直立消波ブロックは、周期5s程度の波を消波対象としている。

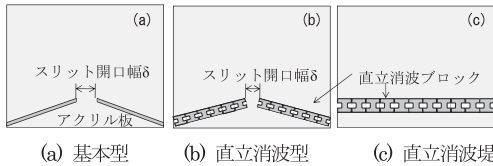


図-3 構造物形状

表-2 実験条件

水深 h(m)	構造物条件			入射波条件	
	構造物形状	構造物幅 B(m)	スリット 開口幅 $\delta$ (m)	波高 H(m)	周期 T(s)
10	基本型	25	0.75	1.00	5, 10
				0.25	30, 50, 60, 70, 90
	直立消波型	25	1.0	1.00	5, 10
			0.75, 1.0	0.25	30, 60
	直立消波堤	-	-	1.00	5, 10

**c) スリット開口部底面付近の流速**

スリット開口部近傍は、水路が狭く流速が速くなるために洗掘が懸念される。そこで、超音波流速計を用いてスリット開口部近傍の流速分布を把握するとともに、スリット開口幅が流況に与える影響について検討した。超

音波流速計は、図-4に示すように開口部から岸沖方向にそれぞれ4.5m地点まで1.5mピッチで設置し、底面から2m地点の流速を測定した。表-3に測定条件を示す。

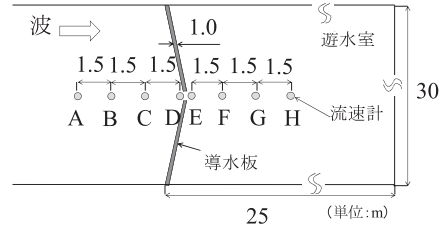


図-4 流速計設置位置

表-3 測定条件

水深 h(m)	構造物条件		入射波条件	
	構造物幅 B(m)	スリット 開口幅 $\delta$ (m)	波高 H(m)	周期T(s)
10	25	0.5, 0.75, 1.0, 1.5	0.25	30, 60, 90

**(3) 実験結果**

**a) 合成波に対する消波性能**

合成波を作用させた場合には、実験の際に投入した浮子の様子から、短周期波成分による動水勾配への影響はわずかであることが確認された。その結果、図-5に示すように、消波性能は長周期波を規則波として実施した実験結果とほぼ同様の結果を示した。これより、短周期波が共存する波浪場においても長周期波の消波性能が予想通り維持できることがわかった。

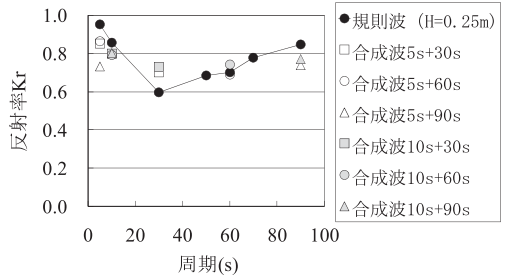


図-5 規則波および合成波に対する消波性能

**b) 消波性能の向上**

直立消波型では、図-6に示すように、長周期波に対しては基本型と同等の消波性能が、また短周期波に対しても反射率の低下が認められたことから、直立消波ブロックを適用することで、広い周期帯の波に対応した消波性能を獲得できることが明らかとなった。また、懸念された直立消波ブロックによる長周期波の消波性能への影響はほとんどないことがわかった。さらに直立消波型は、直立消波堤と比べて短周期波の反射率が低く、直立消波

ブロックをハの字型に設置することで、ブロックの基本性能が向上することが明らかとなった。

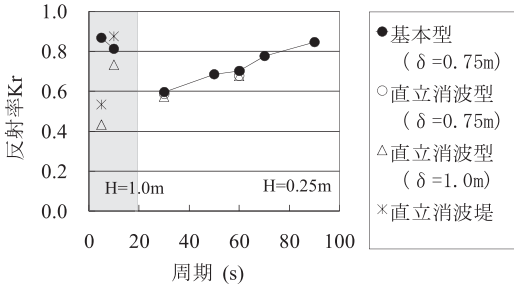


図-6 各構造形式における消波特性

c) スリット開口部底面付近の流速

図-7に、スリット開口幅  $\delta=0.75m$  のときの解析対象波中におけるスリット開口部近傍の流速の最大値を示す。導水板前面では冲向きの流れが、遊水室内部では岸向きの流れが卓越していた。遊水室内部の開口部に近いE点で最大流速が観測され、導水板前面に比べて1.5倍程度速い流速が観測された。また、スリット開口部幅と流速最大値との関係を求めたところ、E点において、周期30s、スリット開口幅  $\delta=1.0m$  の条件で最大流速2.75m/sが観測された(図は省略)。以上の結果をふまえると、スリット開口部の流速は比較的速いものの開口部底面に根固め工等を施すことで、洗掘対策は可能であると考えられる。

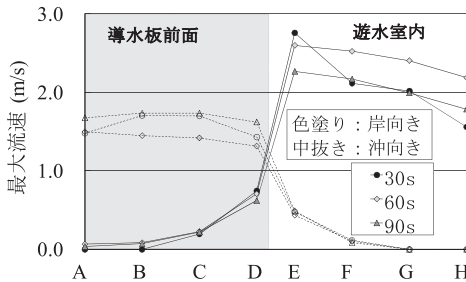


図-7 スリット開口部 ( $\delta=0.75m$ ) 近傍の流速分布

3. 数値計算

(1) 計算手法

渦消波型構造物の消波特性について、下記に示す非線形長波方程式を用いて評価を行った。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - D_x + F_x = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - D_y + F_y = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$D = h + \eta \quad \dots\dots\dots (4)$$

$M, N$ はそれぞれ  $x, y$  方向の線流量、 $\eta$ は水位変動、 $h$ は水深、 $D_x, D_y$ はそれぞれ  $x, y$  方向の水平拡散項、 $F_x, F_y$ は  $x, y$  方向の摩擦項である。差分に当たってはスタガードメッシュを用い、時間微分はリーブフロッグ法、移流項は1次の風上差分を用いた。本計算手法では、移流項に風上差分を用いたため、線流量に比例した拡散係数を有する数値拡散を生ずるが、この効果は近似的にスリット通過後の急拡に伴うエネルギー散逸と同様の役割を果たすと考えられる。それを考慮した上で、水平拡散項  $\epsilon_1, \epsilon_2$ は、噴流に伴う流軸直角方向の拡散と遊水室内の渦に伴う水平拡散について遊水室内のみで考慮した。これを式(5)～(8)に示す。なお、 $n$ はマンニングの粗度係数である。

$$D_x = \epsilon_1 \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \epsilon_2 \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$D_y = \epsilon_2 \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_x = \frac{gn^2}{D^{7/3}} (M\sqrt{M+N}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{D^{7/3}} (N\sqrt{M+N}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

入射波は、導水板から沖に400mの地点より造波させ、造波位置は透過境界とした。また、波高モニタリングは、図-2の水利模型実験の波高計と同じ位置とした。

(2) 計算パラメタの検討

計算に必要な拡散係数および格子サイズのパラメタについて、最適条件を検討した。検討ケースを表-4に示す。

表-4 検討ケース

水深 h (m)	構造物条件		入射波条件	
	構造物幅 B (m)	スリット 開口幅 $\delta$ (m)	波高 H (m)	周期T (s)
10	25	0.75	0.25	5, 10, 30, 50, 60, 70, 90

a) 拡散係数の検討

拡散係数については噴流に起因する拡散係数  $\epsilon_1$  を導水板から遊水室後壁に向かう距離  $l_1$  の1/2乗に比例させた。遊水室内の水平拡散を表す  $\epsilon_2$  は遊水室を構成する壁面からの距離  $l_2$  に比例させ、以下のように与えた。なお  $b$  は遊水室幅を示す。

$$\epsilon_1 = \alpha_1 \sqrt{ghbl_1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\epsilon_2 = \alpha_2 \sqrt{ghl_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

計算に際し、係数  $\alpha_1, \alpha_2$  は、それぞれ0.02とした。図-8に、実験結果と計算結果を示す。なお、拡散係数を考慮しない条件 ( $\epsilon_1=\epsilon_2=0$ ) も併せて示した。

その結果、拡散係数にかかわらず計算結果は概ね実験

結果と一致し、実務的には拡散係数を考慮しなくても、十分に長周期波の消波特性を評価できることが明らかとなった。このことについては後で考察する。

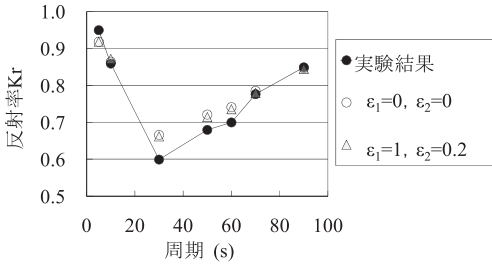


図-8 実験結果および拡散係数別計算結果

**b) 計算格子サイズ**

渦消波型構造物の消波性能の評価は、スリット開口幅における格子数が重要と考えられる。そこでスリット開口幅における格子数を変化させ、精度良く計算できる格子条件について検討した。表-5に格子条件を示す。なお、スリット開口部を9分割した条件では、周期60sの条件についてのみ解析した。

実験結果を図-9に示す。計算結果は、格子サイズによる顕著な違いは見られなかった。また、スリット開口幅が0.75mの条件においては、開口部幅を3分割した格子サイズ0.25mの条件でも十分に評価できることが分かった。

導水板前背面の水位変動は遊水室内への噴流を起こし、波エネルギーの一部は流れエネルギーに転化する。反射率が小さくなるのは、第一義的にはこの波から流れへの変化によってもたらされるものと考えられる。遊水室内の流れエネルギーは自身が励起させた渦によってエネルギーを散逸させるが、これは比較的強い定常流成分が維持できる程度に作用しているにすぎず、反射率への寄与はそれほど大きくない。そのため、数値計算において拡散係数や格子サイズを変化させても反射率に大きな

表-5 格子条件

スリット開口幅の分割数	3	5	9
格子サイズ (m)	0.250	0.150	0.083

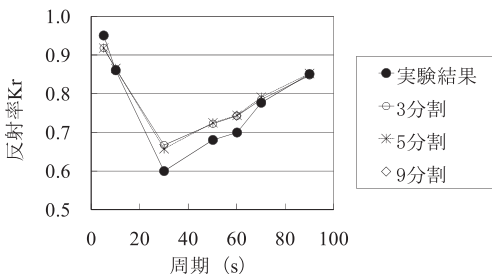


図-9 スリット開口部の格子数による影響

変化が見られなかったと考えられる。したがって、本解析法は拡散係数を特に厳密に評価しなくても、比較的精度よく渦消波型構造物の反射特性を評価できるといえる。

**4. 数値計算の妥当性の検証**

上記検討結果をふまえて、数値解析結果と水理模型実験結果と比較し、数値計算の妥当性を検証した。検討ケースを表-6に示す。なお、計算パラメタ条件は、上記結果をふまえて拡散係数に  $\epsilon_1=\epsilon_2=0$  を適用するとともに、格子サイズは、スリット開口部幅を3分割するサイズとした。また、粗度係数  $n$  は計算結果に大きな影響を及ぼさないことを事前の検討で確認しており、ここでは平滑なコンクリートを想定し、 $n=0.01$  を用いた。

表-6 検討ケース

水深h(m)	構造物条件		入射波条件	
	構造物幅 B (m)	スリット開口幅 $\delta$ (m)	波高 H (m)	周期T (s)
10	25	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25	30, 60, 90
15	25	0.75	0.25	5, 10, 30, 50, 60, 70
	30, 40	0.75	0.25	10, 30, 60
15→10 (1:2 勾配)	25	0.75	0.25	5, 10, 30, 60, 70

**(1) 水深別の再現結果**

図-10に、水深15mの一樣水深における実験および計算結果を示す。水深15mでは周期60sにおいて、計算結果は実験結果に比べて、反射率は10%程度高い値となったが、その他の条件では概ね実験結果と一致し、実務設計に適用できる程度の再現性が認められた。

紙面の都合上図は省略したが、水深5mおよび10mの条件においても同様に検討した。水深10mの条件については、水深15mの条件とほぼ同様の結果となったが、水深5mの場合、水理模型実験では水深が浅いために分散性が優位となり、その結果波の分裂が生じた。一方数値計算では、分散性を考慮していないため波形の分裂は扱

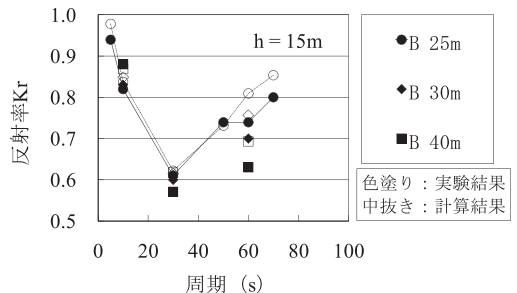


図-10 水深15mにおける実験結果と計算結果

えず、結果として再現性は低かった。このような水深の浅い条件では、ブシネスク方程式等の分散性を考慮した波動方程式を適用する必要がある。

(2) スリット開口幅  $\delta$  による消波特性の再現性

水深10mにおいて、スリット開口幅による反射率の周期特性について実験と計算を比較した。結果を図-11に示す。格子サイズは、スリット開口幅によって変化させたため、スリット開口幅が大きい程、実験結果との誤差が生じやすいと考えられる。スリット開口幅  $\delta=2.0\text{m}$ 、周期30sの条件では、実験値より大きく下回ったものの、それ以外の条件では、格子サイズにかかわらず実験結果とほぼ同様の結果を示し、スリット開口幅が消波性能に及ぼす影響を比較的よく再現できることが明らかになった。

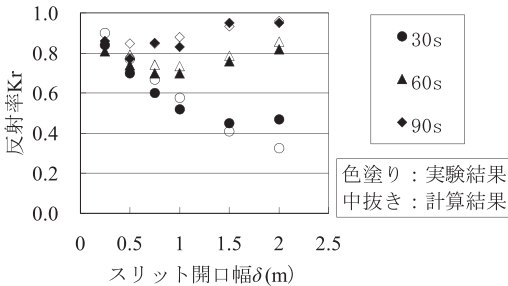


図-11 各スリット開口幅における実験結果と計算結果

(3) 斜面勾配地形の再現性

1:2勾配で水深15mから10mになる斜面勾配地形において、実験結果と計算結果を比較した。その結果、図-12に示すように、計算結果は概ね実験結果と一致し、1:2の急な斜面勾配の条件においても、本手法が適用できることが明らかとなった。なお、図示していないが、同様に1:2勾配で水深15mから5mになる斜面勾配地形についても検討した結果、構造物設置水深が浅く、波の分散性のために実験結果を十分に再現するまでに至らなかった。

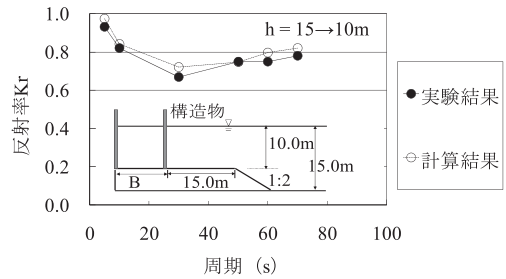


図-12 斜面勾配地形における実験結果と計算結果

5. おわりに

本研究では、渦消波型構造物の実海域への適用性について水理模型実験により評価するとともに、数値計算を用いた簡便な消波性能評価手法について検討した。

本構造物は、長周期波と短周期波が共存する波浪場においても、長周期波に対する消波性能を維持できることが明らかとなった。また、導水板に直立消波ブロックを用いることで、長周期波だけでなく短周期波にも対応した消波構造物となることが明らかとなった。

非線形長波方程式を用いた消波性能評価では、水深10m以深の一樣水深および1:2の急な斜面勾配地形条件においても実験結果との対応は良く、消波性能の簡便な評価手法として有効であることがわかった。

参考文献

池野勝哉・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩 (2004)：長周期波を対象とした直立消波構造物の開発，海岸工学論文集，51巻，pp. 731-735。  
 大島香織・森屋陽一・水流正人・杉田繁樹・平石哲也 (2006)：渦による消波機能を活用した長周期波対策施設の特性，海洋開発論文集，22巻，pp. 145-150。  
 角野昇八・小田一紀 (1986)：任意断面柱体列による波の反射率および透過率の境界値問題解析，土木学会論文集，369号，pp. 213-222。  
 合田良實・鈴木康正・岸良安治・菊地 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。  
 平石哲也・永瀬恭一 (2003)：長周期対策護岸の性能検証実験，海岸工学論文集，50巻，pp. 801-805。