

導水板構造物の長周期波エネルギー低減機構について

Dissipation Performance of the Long-Period Wave Absorbing Structure with Oblique Walls

大島香織¹・森屋陽一²・大塚淳一³・渡部靖憲⁴

Kaori OHSHIMA, Yoichi MORIYA, Junichi OTSUKA and Yasunori WATANABE

Long-period waves are often trapped in a port and harbor, and cause disturbances of cargo handling and damages of mooring ropes for ships. A new type of long-period wave absorption structure which involves two oblique walls and a vertical slit between them has been developed for dissipate the waves. In this paper, through a large eddy computer simulation and visual experimental measurement, flow patterns and vortex structures formed with the proposing structure, depending on a relative structure length with incident wavelength, are investigated. The long-period waves are found to be reduced via a combination of energy exchanges to a pair of circulated flows trapped with in the structure and of energy dissipation due to turbulent jets formed at the slit.

1. はじめに

港内に進入した長周期波による係留船舶の動揺により、荷役稼働率が低下する問題が全国の港湾で報告され、ソフト面、ハード面から様々な対策が提案されている。構造物によるハード対策は、港内の静穏度を向上させる面からも抜本的な対策として有効である。対象とする長周期波の周期に対し反射率 0.7 程度の対策工を適切な位置に配置することで荷役稼働率を 10% 程度向上させることも可能となる。長周期波対策として平石ら (2003)、池野ら (2004) がレキを用いた構造を提案しているが、構造物幅が 50 m 程度必要となるため、航路の確保などが問題となり構造物の小型化が課題であった。そこで、著者ら (2006) は導水板で渦を励起する幅 20 ~ 25 m 程度の構造物を提案し (図-1), 2 次元水理模型実験により有効な消波性能を確認したが (図-2), 本構造の消波メカニズムには導水板を含む構造的なパラメータが多いため、低減性能をモデル化し最適な構造形式を明らかにできていない。

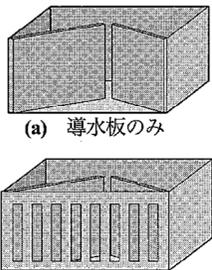


図-1 導水板構造物

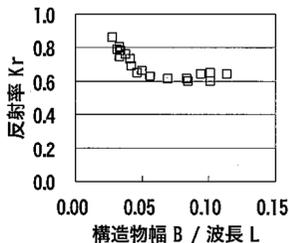


図-2 実験による新型構造物の反射率の波長依存性 (B: 構造物幅, L: 波長)

本研究は、導水板構造物の性能評価を簡便に行うための水理モデルの構築を目的とし、エネルギー低減メカニズムを明らかにするため、3次元 Large Eddy Simulation (以下 3次元 LES と記す) による数値実験により構造形式や周期による低減性能について検討を行った。また、流況場の可視化実験により導水板近傍と遊水室内の流れ場を特徴化し、エネルギー低減機構について検討を行った。

2. 可視化実験

長周期波の作用による導水板近傍と遊水室内に発生する渦等の流況場の現象を特徴化するために、PIV (Particle Imaging Velocimetry) による遊水室内流速の画像計測を行った。計測にはその誤差が 5% 程度と確認されている標準的 PIV 法 (大塚ら (2006)) を使用した。

(1) 実験方法と条件

暗室に設置された延長 8 m, 幅 25 cm, 高さ 60 cm の三面アクリル製 2 次元造波可視化可変勾配水槽を用い、縮尺 1/120, 表-1 の条件で実験を行った。造波板からスリット開口部までの距離を 6.2 m となるよう模型を設置した (図-3)。構造物内に中立粒子を散布し、水槽側方に設置した YAG レーザーからレーザーシートを水平に照射し (照射水深: $h/2$), 中立粒子からのレーザー散乱光を 8 bit デジタルビデオカメラで撮影した。フレームレートは 29.5 fps, 解像度は 1K × 1K, 撮影領域は構造物全体がフレーム内に含まれるように設定した。水槽が波長に対し短いため多重反射系の部分重複波浪場で行った。

表-1 実験ケース (現地スケール)

case	構造物幅 B (m)	導水板		入射波	
		角度 θ (°)	開口幅 w (m)	波高 H (m)	周期 T (s)
1	20	15	0.75	0.5	30, 60, 90
2	25	15	0.75	0.5	30, 60

1 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
2 正会員 博(工) (財)沿岸技術研究センター
3 学生会員 修(工) 北海道大学大学院工学研究科
4 正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科

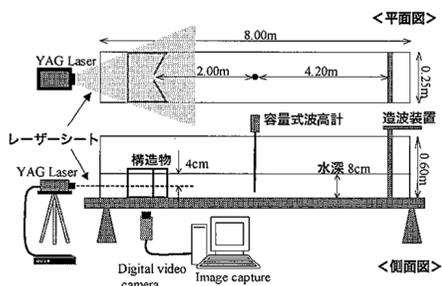


図-3 実験装置概要

(2) 実験結果

a) 循環流によるエネルギー捕捉効果

図-4 に時間平均流速 (case2) を示す。遊水室内には構造物幅スケールで回転する 1 対の大きな循環流が生じている。この循環流は全てのケースで確認されており、本構造は構造物に作用した長周期波のエネルギーを波動性のない回転流れ(循環流)として遊水室内に捕捉する役割を持つことが確認された。図-5 は、case2 (周期 60 s) の位相平均流速の結果である。1/8T でスリット開口部より構造物内への長周期波が噴流として進入し、時間とともに構造物奥へ移動している。4/8T ではスリット

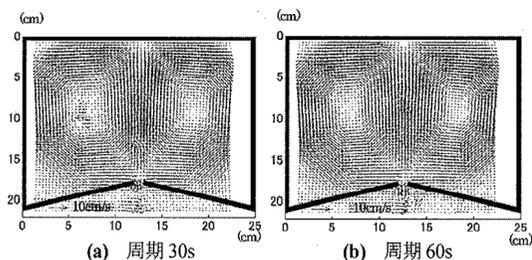


図-4 時間平均速度 (case2)

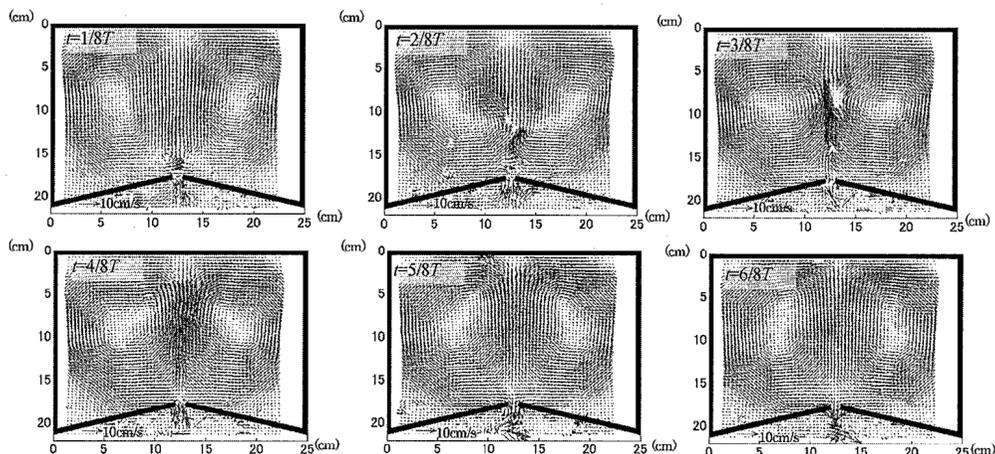


図-5 位相平均流速 (周期60s, 幅25cm)

開口部から構造物外へ転じた噴流が発生するとともに、構造物奥へ進む強い流速が存在している。さらに時間が進むと背後壁に衝突した流れが 2 股に分かれ、循環流を駆動する過程が確認できる。

b) 乱れによるエネルギー散逸

位相平均流速 U と時間平均流速 \bar{U} の差より次式のように残差流速 U' を定義し、ネットの流入出流速分布を調べた (図-6)。

$$U' = U - \bar{U} \dots \dots \dots (1)$$

スリット開口部より遊水室内へ流れ込む噴流は、スリットから剥離し左右に振動しながら 1 対の剥離渦を形成していく。剥離渦はそのスケールを大きくしながら構造物奥へ進み、背後壁に衝突した後に消散する。すなわち、ネットで構造物に流入する噴流の運動エネルギーは剥離渦内での散逸と大規模循環流の定常的な駆動のために消費される。

乱れエネルギー k を瞬時流速 u と位相平均流速 U より次式のように定義する。

$$k = \overline{|u - U|^2} / 2 \dots \dots \dots (2)$$

case2 の乱れエネルギー分布を図-7 に示す。1/8T でスリット開口部より遊水室内に乱れエネルギーが発生している。その後、乱れエネルギーを増加させながら構造物奥へ移流し、背後壁への衝突とともにエネルギーが消散していく。この剥離渦による乱れエネルギーは、渦が遊水室内で十分に発達し消散する過程に移行する前に背後壁に衝突している。

一方、この剥離渦スケールの高強度乱れエネルギー領域以外の大規模循環流領域では顕著な乱れエネルギーは確認できない。すなわち、大規模循環流は定常的に流れを構造物内に捕捉するだけで直接的な乱れエネルギー散逸に寄与するものではないと考えられる。また、図示していないが、構造物幅が大きいほうが強い循環流が捕捉されていることが確認された。

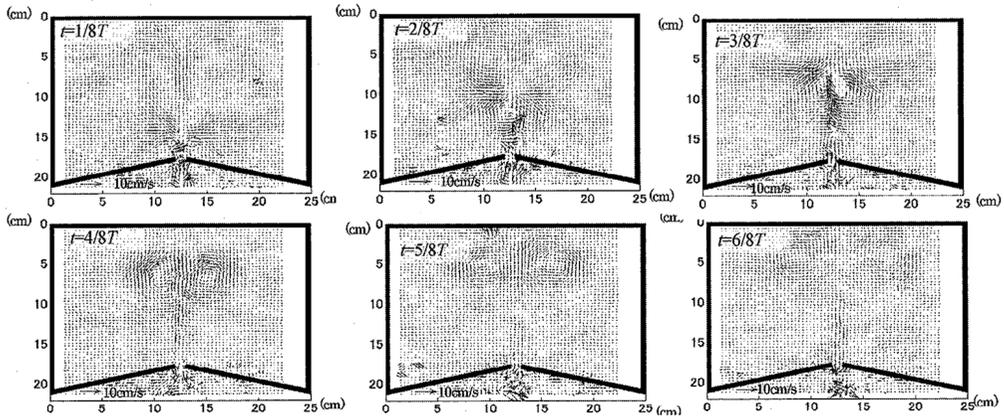


図-6 残差流速 (周期60s, 幅25m)

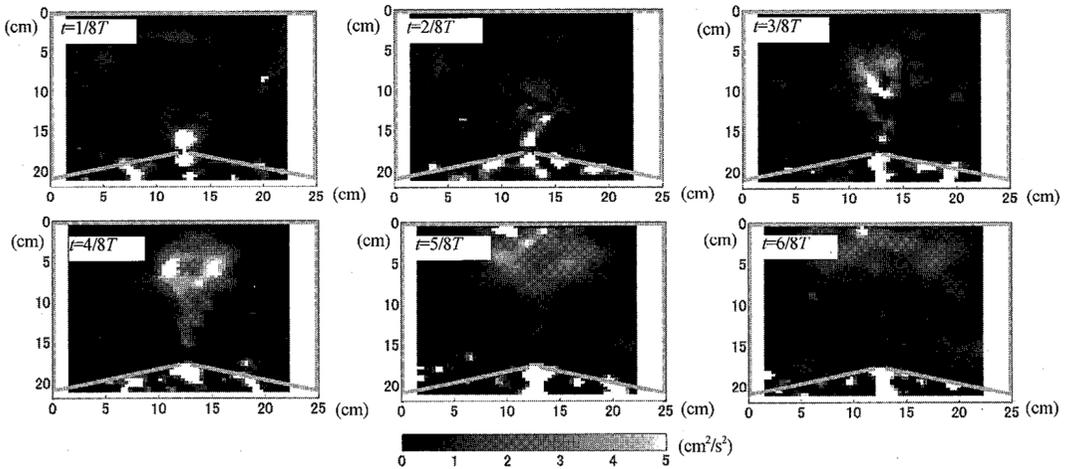


図-7 乱れエネルギー (周期60s, 幅25m)

c) エネルギー低減効果の周期特性

波の周期の違いによる流況場の違いを、時間平均流速 (図-4) で比較すると、遊水室に捕捉される循環流に大

きな違いは確認されない。また、噴流により生成した剥離渦のエネルギーが大きい位相の乱れエネルギー (図-8) を比較すると、周期が長いほうが高強度の乱れエネルギーが、広い範囲に分布している。これは長周期波の波高低減効果が高いという実験結果と矛盾しない。以上の結果より、導水板構造物は長周期波のエネルギーを、噴流による剥離渦の乱れエネルギーと大きな循環流の運動エネルギーとして遊水室に捕捉する効果を有していることが明らかとなった。

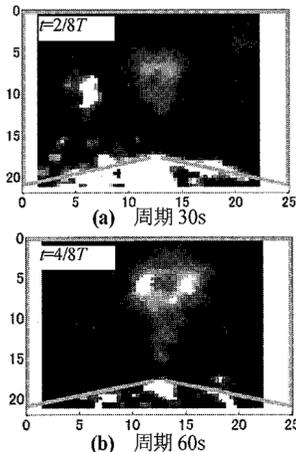


図-8 乱れエネルギー (case2)

3. 3次元数値計算

(1) 数値計算方法

本研究では、加藤ら(2002)と同様な Subgrid Scale 成分のモデルを用いた3次元 LESを導水板構造物への波浪応答問題へ適応した。2グリッドサイクルの多重格子法を用いポアソン方程式の収束計算を行っている。導水板は波向に対して斜めに設置されているため、楕円方程式モデルによる準直交適合格子を形成し、複雑な構造形状をも

つ構造物内外の流体運動を再現した。表-2に示す構造物形状に対し、渦形成、波浪応答及びエネルギー散逸の時空間変化について検討した。スリット壁の開口率は50%である。表-3に示す計算条件で計算を行った。周期が長くなると計算領域が大きくなるため、計算メモリ及び計

表-2 構造物形状

case	形状
1	導水板のみ
2	導水板 + スリット壁
3	スリット壁のみ

表-3 計算条件 (周期: 現地スケール)

周期	H/h	h/L	B/L	w/L	$\frac{\Delta x/h}{\Delta y/h}$	$\Delta z/h$	$\Delta t/T$	case
5s	0.05	0.274	0.547	0.021	0.05	0.025	1/256	1, 2, 3
10s	0.05	0.108	0.217	0.008	0.05	0.025	1/256	1, 2, 3
20s	0.05	0.051	0.103	0.004	0.05	0.025	1/256	1, 2, 3
30s	0.05	0.034	0.068	0.003	0.05	0.025	1/256	1, 2

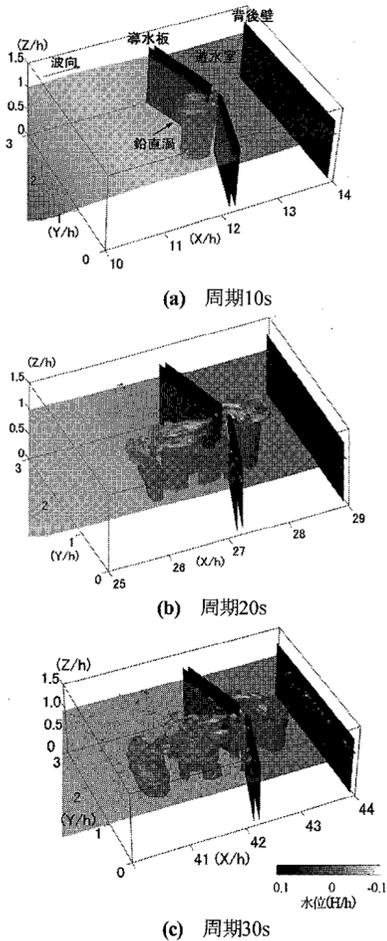


図-9 長周期波到来時の数値実験結果 (水位と渦管分布) の一例

算時間の関係上、周期30s迄の計算が限界である。ここで、 H は入射波高、 T は入射波周期、 h は水深、 L は波長、 B は構造物幅、 w はスリット開口幅、 Δx , Δy , Δz は各軸方向の空間メッシュサイズ、 Δt は計算時間ステップである。また、本計算では重複波浪場が形成される前の進行波である点が、可視化実験と異なる。

(2) 導水板構造物の周期特性

長周期波の伝達による導水板前背面の水位差により噴流が発生し、水深方向に一樣な鉛直渦が生成される。渦のスケール、強度、輸送範囲は、導水板前背面の水位差に依存し、周期が長くなると大きくなる (図-9)。短周期波の遊水室の水位変動は非常に小さく、噴流速及び渦強度は導水板前面の水位変動に依存する。一方、長周期波は位相差を持つ発達した重複波が遊水室内に形成され導水板前後の水位差が著しく増加し、強い乱れや渦の生成を促しエネルギーを低減させる (図-10, 11)。乱れエネルギー損失 ϵ を入射波エネルギー E で無次元化し乱れエネルギー逸散率を求め、周期特性について評価した (図-12)。周期30s ($B/L=0.068$) で最も逸散率が大きい結果は、図-2に示した2次元実験結果で B/L が0.06~0.08で極値を示す結果とも一致しており、更に周期の長い長周期波 (60s, 90s) に対してはエネルギー低減率が低下すると考えられる。図-8で周期が長いほう

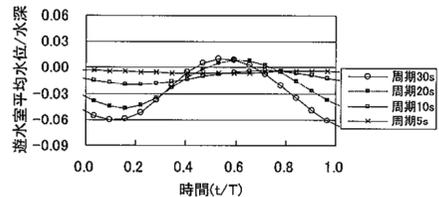


図-10 遊水室水位変動

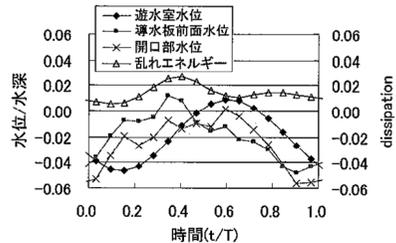


図-11 乱れエネルギー散逸と水位の時系列変化 (case2, 周期20s)

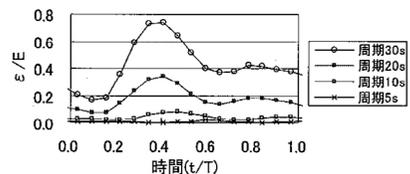


図-12 乱れエネルギー散逸率 (case2)

が高強度乱れエネルギーが広領域で発生し、エネルギー散逸につながることから、長い周期に対し高い消波性能を確保するには、構造物幅を大きくし、 B/L を適切な値となるように設定する必要がある。

(3) 構造形式による消波特性比較

表-2の構造形式別に乱れエネルギー逸散率を比較した(図-13)。周期が短いと構造形式による違いは小さいが、周期が長くなると導水板構造物(case1)の逸散率が最も増大しており、導水板構造の長周期波に対する消波効果が高いことがわかる。周期20sで逸散率が大きい時間の渦管の形成状況を図-14に示す。導水板のみ(case1)が噴流による渦のスケール、強度、輸送範囲とも大きく、スリット壁を設置すると渦の輸送を阻害して

いる(case2)。スリット壁のみ(case3)では渦のスケール、強度、輸送範囲とも小さく、消波効果が得られていない。

4. おわりに

本研究では、導水板構造物の性能評価を簡便に行うための水理モデルの構築を目的とし、エネルギー低減メカニズムを明らかにするため、流況場の可視化実験と3次元LESによる数値計算により長周期波低減機構について検討を行った。

1対の斜めに配置した導水板と幅の狭いスリット開口部により、遊水室内にスケールの大きな循環流が形成され長周期波のエネルギーを捕捉していることを示した。また、噴流の効果で乱れエネルギーが生じ、周期が長い際にはその散逸過程において構造物幅が重要となることを確認した。

3次元LESにより、本構造は遊水室内で入射波と位相差をもつ重複波としてエネルギーを捕捉するとともに、導水板前背面で水位差を生じさせることで、スケール、強度、輸送範囲の大きな渦を生成させ、長周期波のエネルギーを低減させることが明らかとなった。

最後に本検討で明らかとした長周期波低減機構の模式図を図-15に示す。スリット壁のみの構造物では②③の効果がなく長周期波の低減性能が低い。上の結論で得た各メカニズムに対し遊水室面積及び開口率を決定することで対象周期に対して効果の高い構造を構成できる。

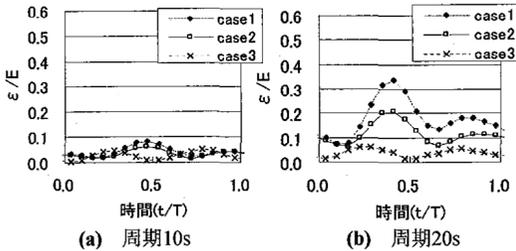


図-13 構造物形式による乱れエネルギー逸散率比較

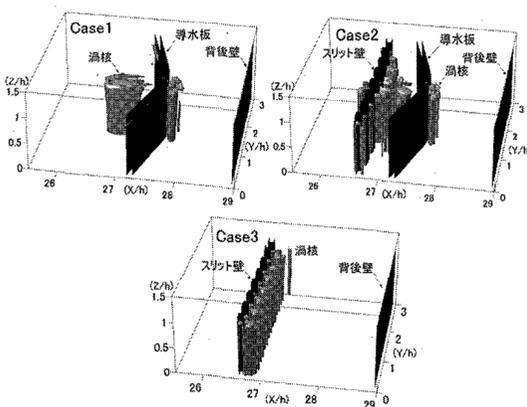


図-14 構造物形式による渦形成状況比較 (周期20s, $t/T=0.41$)

参考文献

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.
 池野勝哉・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩(2004):長周期波を対象にした直立消波構造物の開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 731-735.
 加藤雅也・波部靖憲・佐伯 浩(2002):直立堤頭部近傍の局所流体特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp716-720.
 大島香織・森屋陽一・水正正人・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, 第22巻, pp 145-150.
 大塚淳一・波部靖憲・横山 肇・武田 靖(2006):三次元的碎波遷移に伴う波峰方向流速と渦スケールの時空間変化, 海岸工学論文集, 第53巻, pp 86-90.

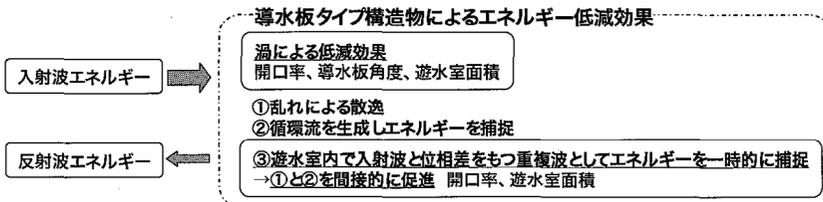


図-15 新型導水板タイプ構造物による長周期波エネルギー低減メカニズム