

縦スリット型藻礁の設計条件に関する研究

瀬戸 雅文*・水野 武司**・梨本 勝昭***

1. はじめに

近年, 砂浜域砕波帯内にコンブなどの藻場を造成しウニやアワビなど岩礁性有用種の増殖場として利用するための環境改変手法に関する研究が実施され始めている。著者らは, 強波浪や浮遊砂の発生など, 水産生物の生息にとって厳しい水理条件を有する当該域で対象種を適正に増殖・管理するための施設として, 縦スリット型藻礁(図-1 参照)を考案し, 前回の報告で波の入射方向と平行にスリット面を配置した場合の施設による波変形特性について検討した(瀬戸ら, 1997)。本報告は前回に引き続いて, スリット面に対して入射波が様々な迎え角を持って進入する場合の施設の水理特性, 流体力特性について検討するとともに, ウニの生息空間としてスリット内に空隙を配置する場合の設計条件について検討した。

2. 施設の水理特性

2.1 実験方法

水理模型実験で使用した供試模型の諸元を図-2, 実験概要図を図-3 に示す。実験では模型の堤高(d)とスリット壁の厚み(c)を各 8 cm および 1.5 cm に固定した上で, 天端幅(b)を 7.5~60 cm まで 5 通り, スリット壁の中心部を基準としたスリット壁の配置間隔(a)を,

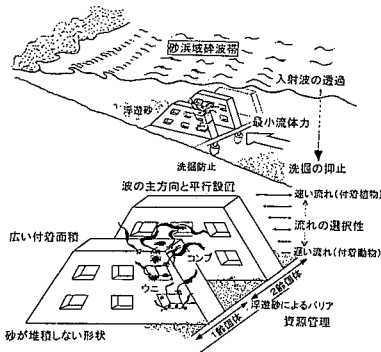


図-1 縦スリット型藻礁のイメージ

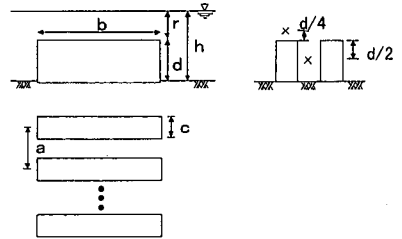


図-2 供試模型の諸元

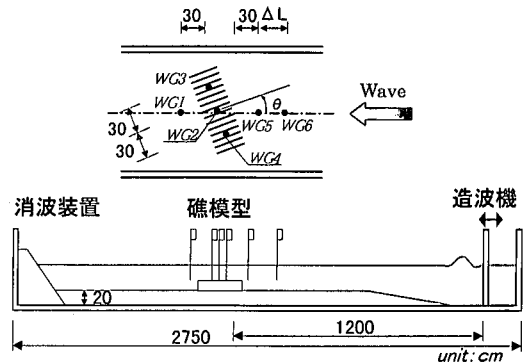


図-3 波変形特性実験概要図

1.5~15 cm まで 6 通り変化させた。さらにスリット壁面に対する波の迎え角 (θ) を 0~60 度まで 9 通り変化させ, フールド縮尺 1/30~1/40 (現場換算で堤高 2.0~3.0 m, スリット厚 0.45~0.6 m) 程度の実験を実施した。

2.2 砕波特性

施設設置前・後において当該域の砕波条件に顕著な差違が生じないために施設が満足すべき条件について検討した。図-4 左図は, スリット壁の間隔パラメータ (c/a) と施設設置に伴う砕波限界波高比 (H_b/h) の関係を水深パラメータ (d/h) 及び天端幅パラメータ (d/b) で整理して示したものである。これより, 施設による砕波限界波高は, 設置水深, 天端幅及び堤高に依存しながらスリット壁間隔の拡大とともに曲線的に増大し, 施設設置前の当該水深及び入射波条件に対する砕波限界波高比 (今回使用した実験波の条件でほぼ $H_b/h=0.7$ 程度となり図中点線) に達することがわかる。図中の各曲線が $H_b/h=$

* 正会員 水博 北海道立中央水産試験場 水産工学室
** 水修 水修 ㈱ニチロ
*** 水博 北海道大学水産学部 海洋生産システム学科

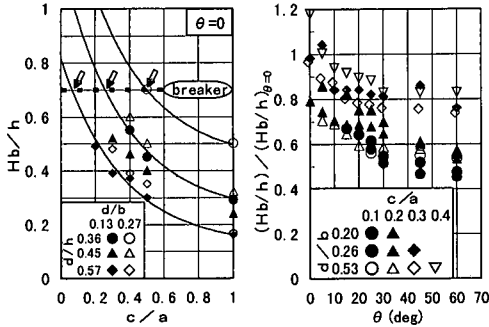


図-4 スリット壁間隔と碎波波高

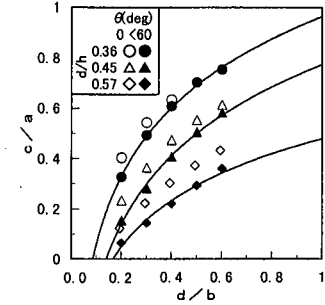


図-6 縦スリット型藻礁の碎波指標図

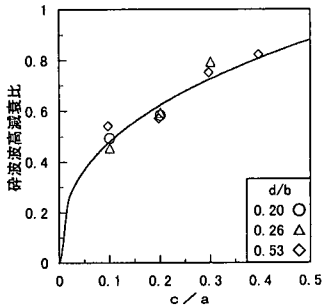


図-5 碎波波高減衰比の c/a による変化

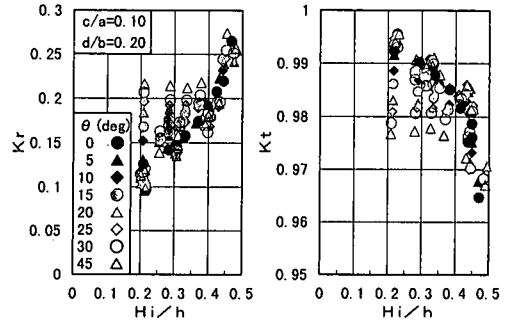


図-7 施設の波反射・透過特性

0.7に達した時点におけるスリット壁間隔パラメータの値は、施設に伴い新たな碎波が生じないために必要とされるスリット壁の最小配置間隔を意味している。さらに、図-4右図は、スリット壁の配置条件に伴う碎波波高比 (H_b/h) の迎え角 (θ) による変化を、迎え角 0 の場合の値 $(H_b/h_{\theta=0})$ で基準化（以後、碎波波高減衰比と定義）し、スリット間隔パラメータ (c/a) とスリット天端幅パラメータ (d/b) で整理して示したものである。これより、何れのケースについても、碎波波高減衰比は迎え角の増加とともに小さくなり、より小さな波高でも施設による碎波が生じるようになる。また、各ケース共に、迎え角 θ が約 45 度以上になると減衰の程度は小さくなる。

図-5は、迎え角 θ が 45 度以上について、碎波波高減衰比を平均した上で、スリット間隔パラメータ (c/a) による変化を天端幅パラメータで整理して示したものである。これより、碎波波高減衰比は何れの天端幅においても、スリットの間隔条件よりほぼ決定できることがわかる。これらの結果をもとに、施設による碎波が発生しないための施設の最小配置間隔の天端幅による変化を計算すると図-6となる。これより施設設置水深、天端幅及び堤高をもとにスリット壁の配置間隔を決定することが可能となり近似的に次式で表現できる。

$$c/a \leq 1.06(h/a) \ln(d/b) + 1.66 \ln(h/d) + 2.13 \dots (1)$$

2.3 波反射・透過特性

図-7は天端幅が 45 cm (d/b で各 0.20) の実験ケースについて、施設による新たな碎波が生じない条件下(図-6参照)における施設の波反射率 (K_r) 及び透過率 (K_t) を波高水深比 (H_i/h) 及び迎え角 (θ) をパラメータとして示したものである。これより、施設に対する波の透過率(反射率)は迎え角 θ が $0 \sim 15$ 度程度の範囲においては、スリット間隔によらずほぼ同一の曲線上を波高水深比の増加とともに徐々に減少(増加)する傾向が認められる。また、迎え角が増加すると、スリット壁による遮蔽効果の規模が波長との関係で変化するため、波高水深比が小さい領域において、波周期によるパラツキが認められるようになるが、何れの範囲においても $K_t = 0.96$ ($K_r = 0.27$) 程度以上(以下)と極めて透過性が高く(反射が小さく)施設による顕著な波の変形は認められない。従って、本施設は入射波の迎え角がある程度存在する場合においても、式(1)のスリット壁配置条件を満足していれば、施設の設置が波浪変形に及ぼす影響は極めて小さいものと考えられる。

2.4 流速分布特性

図-8左図はスリットの迎え角を 0 に固定し、天端幅 15 cm ($d/b = 0.53$)、水深 14 cm ($d/h = 0.57$) の実験ケースについて、スリット壁の間隔を変化させた場合の天端上より各 4 cm ($=d/2$) 下方のスリット壁間における水平

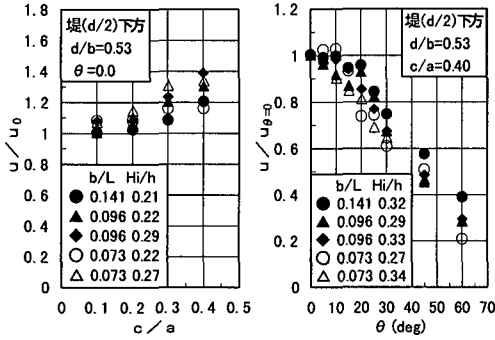


図-8 スリット間の流速特性

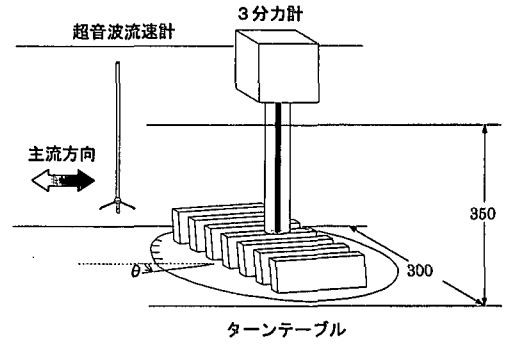


図-9 流体力実験概要図

流速値 (u) を、施設が無い場合の同一水深における流速値 (u_0) で基準化して示したものである。これより、天端上より $d/2$ 下方のスリット壁間の中心部における水平流速値は $c/a < 0.3$ の範囲では波浪条件によらず施設設置前の 1.3 倍程度以下の値に留まり、スリット壁間における顕著な流速値の上昇は認められない。続いて、図-8 右図はスリット壁の間隔を一定 ($c/a=0.4$) に保った状態で、迎え角 θ を変化させた場合の、天端上より $d/2$ 下方のスリット壁間の中心部における流速値の変化を $u_{\theta=0}$ で基準化して示したものである。これより、何れの波条件においても、スリット間流速は迎え角の増加に伴い、徐々に減衰し、 $\theta > 45$ 度では主流流速値の半分程度以下まで減衰している。

一方、スリットの上部付近における流速値は、迎え角が 0 の場合は、スリット壁間が完全に遮蔽されている従来型の潜堤 ($c/a=1.0$) においては天端上の流速値が、天端幅と入射波の諸元に依存して大きく変動し、最大で施設設置前の 2.2 倍程度の流速値に達するのに対して、 c/a が 0.5 以下のスリット壁の配置間隔においては、天端上における流速値の増大が u_0 の 1.2 倍程度以下と施設設置前とほとんど変化しない。また、迎え角の増加に伴う流速値の上昇は極めて小さく、特に $\theta > 30$ 度においては、 θ の増加とともに主流の流速値に対して徐々に小さな値をとるようになる。これは、迎え角の増加による施設前面よりの反射などの影響と考えられるが、何れにおいても施設設置に伴い周辺海域へ与える水理的な影響は極めて小さいものと考えられる。

3. 施設の流体力特性

3.1 実験方法

流体力の計測は、鉛直循環式小型振動流水槽を使用して実施した。本水槽は最大流速 ± 1.0 m/s の範囲で任意の非定常流 (振動流の最大流速振幅は周期に依存) を発生させることができる (図-9 参照)。

定常流場における抗力の測定は、天端幅パラメータ

(c/b) が 0.05, 0.10, 0.20 の 3 タイプのスリット形状に対して、主流の流速を 0.1~0.9 m/s まで 9 通り変化させ、各流速値についてスリット間隔パラメータ (c/a) を 0.75~0.0 (単体スリット) まで 4 通り、迎え角を 0, 10, 20, 30, 45 度の 5 通り変化させ計 540 ケースについて実施した。また、質量力の測定は、抗力測定と同様に 3 タイプのスリット形状に対して、主流の振動周期を 2.0, 4.0, 6.0 秒の 3 通り、各周期毎に流速振幅を 0.1~0.6 m/s まで変化させた上で、抗力測定と同様に (c/a) 及び迎え角を変化させて計測した。

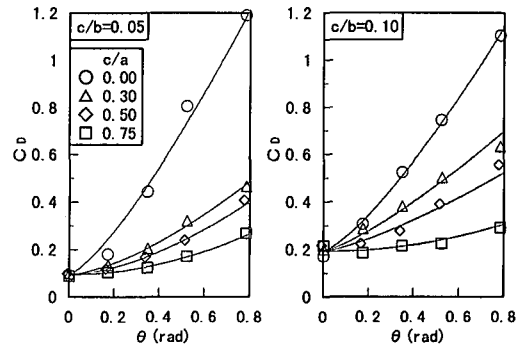


図-10 C_D の迎え角による変化 (スリット単体)

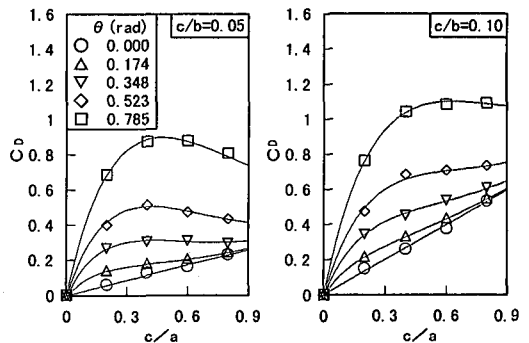


図-11 C_D の迎え角による変化 (礎単位幅)

3.2 抗力特性

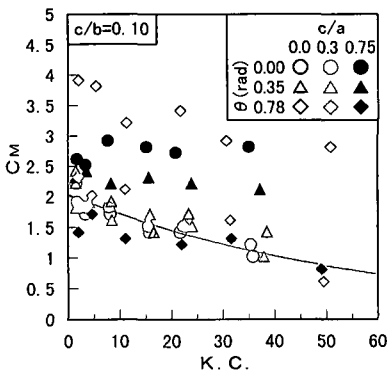
図—10は $c/d=0.05$ 及び 0.10 について、スリット1枚に作用する抗力係数 (C_D) 値の迎え角 θ による変化を c/a をパラメータとして示したものである。ここに、射影面積は、スリットに作用する流体力においては形状抵抗と比較してスリット面に作用する表面摩擦抵抗が卓越するものと仮定して、提高と天端幅の積として計算している。図より、スリット1枚に作用する抗力は迎え角、及びスリット間隔の拡大とともに増加する傾向を呈し、さらに提高に対する天端幅が広がるほど減少していることがわかる。但し、スリット間隔が狭くなれば、礁の単位幅当たりのスリット壁の枚数は多くなることから、施設の安定を検討する場合には礁の単位幅当たりの C_D 値について検討する必要がある。

図—11は、礁の横幅を提高により基準化した場合の単位幅当たりに作用する抗力の C_D 値を c/d が $0.05, 0.10$ の場合について (c/a) 及び θ をパラメータとして示したものである。これより、施設のスリット間隔及び設置海域の波向き条件等が解れば施設の単位横幅当たりに作用する抗力を推定可能となり以下の式で近似できる。

$$C_D = (d/a) \{ 2.01(c/b)^{1.21} + 1.24 \cdot \exp(-2.05(c/a)\theta^{1.13 \exp(0.99(c/a))}) \} \dots (2)$$

3.3 質量力特性

図—12は c/b が 0.10 のスリットにおける、質量力係数 C_M の K.C. 数 ($= Tu_{max}/b$: T は波周期) による変化を、 c/a 及び迎え角をパラメータとして示したものである。これより迎え角 θ の場合においては、スリットの間隔が極端に狭くなると境界層の発達の影響でスリット壁間の水塊が付着後流化し C_M が急増する傾向が認められる。しかしながら、 $c/a < 0.5$ においては c/b によらず K.C. 数に依存しながらほぼ同様の値で減衰する傾向が認められた。また、迎え角の増大とともに、特に単体スリットの場合には、背後に大規模な後流域を形成するようになるために C_M 値も増大する。しかしながら、 c/a が



図—12 C_M の K.C. 数による変化

0.3 程度以上であれば、 c/b 及び迎え角によらず K.C. 数に依存しながらほぼ同様の値で減衰する傾向が確認され、以下の式で近似的に定式化できる。

$$C_M = 2.04 \exp(-0.017 K.C.) \dots (3)$$

4. ウニ生息空隙の設計条件

4.1 エゾバフンウニの流動耐性

実験には、海水温 $5^{\circ}C$ で2ヶ月間飼育されたエゾバフンウニ種苗を使用した。振動流の設定周期を8秒に固定し、流速振幅を約2分間隔で 5cm/s ずつ上昇させ、ウニがとばされた時点での耐流限界流速 (u_D) を計測した。さらに、振動流中で $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 矩形形状のコブを与えた場合の摂餌速度比 (振動流中の日間摂餌量を静水中における値で除した量) が 0.5 以下となる流速振幅を摂餌限界流速 (u_s) と定義した。図—13は耐流限界流速、及び摂餌限界流速を示したものである。これらより、エゾバフンウニの摂餌限界流速は耐流限界流速のほぼ 16% 程度となり殻径 (SD) を用いて次式で近似できる。

$$u_D = 38.88 SD^{0.72} \dots (4)$$

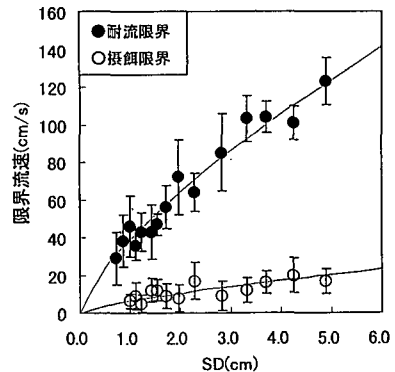
$$u_s = 6.34 SD^{0.72} \dots (5)$$

4.2 エゾバフンウニの流体力特性

振動流水槽内の底面に固定された水中3分力計に、ホルマリン固定したウニを設置してウニの作用流体力を計測した。図—14は、エゾバフンウニの抗力係数 (C_D) 及び質量力係数 (C_M) を、殻径を代表長さとするレイノルズ数 (Re) および K.C. 数で整理して示したものである。これより、抗力係数はレイノルズ数の増加とともに若干減少しながら変動しており次式で近似できる。

$$C_D = 7.19 Re^{-0.22} \dots (6)$$

また、質量力係数については K.C. 数の増加とともにほぼ 0.72 程度に収束していることがわかるが、抗力に対する質量力の割合は、種苗サイズにおいては一般に無視できる程度に小さい。さらに、図—13、図—14をもとにエゾバフンウニの付着力 (F_b) が算出され、近似的に次式



図—13 エゾバフンウニの流動耐性

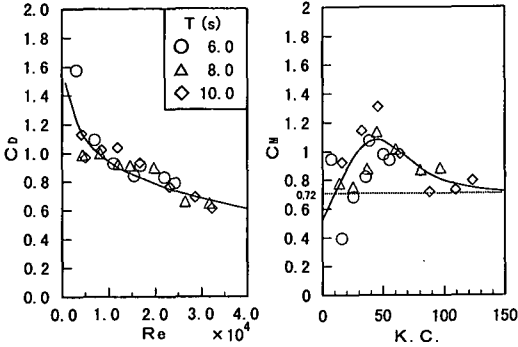


図-14 エゾバフウニの流体力係数

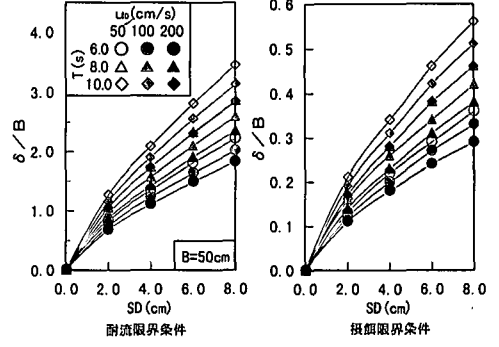


図-17 施設空隙の配置条件

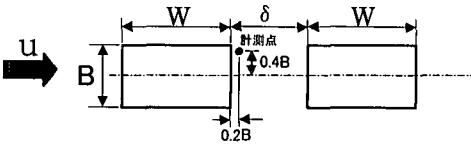


図-15 スリット内の空隙設定条件

するとともに、発生渦の発達の程度は K. C. 数に依存しながら変化するものと考えられる。図より、 $\delta/B < 1.2$ で空隙外縁の流速は急激に増加している。図-16 右図は、 δ/B が 1.2 より小さい場合の空隙内流速値の K. C. 数による変化を示したものである。空隙内流速値は K. C. 数の増加とともに減少し K. C. 数が 30 程度以上で主流流速の半分程度以下まで減衰しており次式で近似できる。

$$u_w = 7.29 u_0 (\delta/B) \cdot K.C.^{-0.86} \dots\dots\dots (8)$$

図-17 は、スリット壁厚が 50 cm の場合の δ の設計条件を、波周期 (T) 及び流速振幅 (u_0) 及び設長 (SD) で整理して示したものである。このように空隙間隔 δ は施設構造及びウニの諸特性より決定することができる。

5. おわりに

縦スリット型藻礁は、実用上 c/a を 0.3~0.5 程度に設定すれば、スリット内の流速分布及びスリットに作用する流体力の両面より、縦スリット型藻礁の水理特性を単純化できて、施設の設置水深、スリットの厚み、堤高を元に、(1)式より天端の許容幅が決定され、(2)、(3)式をモリソン式に代入することにより安定条件が計算できる。さらにウニの生息空間として礁内に設置される矩形形状の空隙の条件は (8) 式による空隙外縁における壁面流速値を、ウニの耐流・摂餌限界流速の基準値として採用すれば、スリット壁厚、波周期、施設設置海域の振動流速の振幅及びウニの殻径を条件として導かれる。

最後に本研究は、社団法人マリノフォーラム 21 の技術開発に関する助成の支援を受けて実施されたものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

瀬戸雅文・水野武司・山田俊郎・梨本勝昭 (1997): 縦スリット型藻礁の水理特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 971-975.

で評価できて、流体力特性及び付着力をもとに様々な振動流場におけるエゾバフウニの耐流限界条件を推定することが可能となる。

$$F_o = 0.41 SD^{3.05} \dots\dots\dots (7)$$

4.3 スリット壁内の空隙条件

縦スリット型藻礁の壁面に配置するウニ生息空隙のサイズを、空隙内の壁面近傍における流速値がウニの耐流限界条件以下に留まるように決定する。本報告では、スリット壁に垂直に矩形形状の空隙を副列配置することとして、図-15 に示すように、矩形形状の空隙の主流方向の距離 (δ) の設定条件について検討した。図-16 左図は空隙内の壁面外縁部 (図-15 内の黒丸点で、ほぼ空隙内の伴流渦の外縁に相当する) における流速 (u_w) の、 δ による変化を主流流速 (u_0) で基準化して示したものである。空隙内の流れの様子は、空隙間隔に大きく依存する。即ち、矩形の隅各部より発生する後流渦の規模が δ に依存

図-16 空隙内の流速特性