

傾斜版列を前面壁とする遊水室型防波堤による曝気効果について

Aeration Activations of a Water Chamber Type Breakwater with an Inclined Plate Array as a Front Wall

中村孝幸¹・中村英輔²

Takayuki NAKAMURA and Eisuke NAKAMURA

In order to improve the seawater quality in a harbor, a new type of pile supported breakwater with a water chamber was examined experimentally. The new breakwater is comprised of an inclined plate array as a front wall and a curtain wall as a rear wall. A horizontal plate is also attached to the rear wall at the lower end. Especially, for activating the aeration of basin water, the wave interaction process with the breakwater near the water surface was enhanced. The piston mode wave resonance in the water chamber of the dissipater is a main driving force to activate the entrainment and diffusion of air bubbles to the water. Both the functions of wave energy dissipation and activation of the aeration have been examined. It is seen that the front wall of down fin type is most effective to increase dissolved oxygen rate in the water.

1. はじめに

既に著者ら(中村ら, 2006)は, 潮位差の大きい海域に対して, 潮位の影響を受けることなく波浪制御効果および海水交換機能を維持した構造として, 没水平版を設けた前面壁を傾斜版列とする二重式カーテン防波堤(以下, 傾斜版列防波堤)を提案している。また, 流況観測から前面の傾斜版列に波が衝突することにより, 多量の気泡の発生が確認されており, 遊水室内のピストンモードの波浪共振により生成される渦による水塊の乱流運動の促進と併せて有意な曝気効果が期待できる。

本研究では, 近年問題となっている港内域の水質汚染に対して, 傾斜版列防波堤の海水交換機能および曝気効果による水質改善効果について検討する。この際, 水質改善の指標として溶存酸素濃度(以下, DO)を用い, その回復度合いと水理学的な機能の関連性などについても考察する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験には, 愛媛大学工学部の2次元小型造波水槽(長さ5.5m×幅36cm×高さ50cm)を使用した。その諸元を図-1に示す。水路の一端には造波機, その背後に消波材としてヘチマロンを設置した。ただし, 水路の他端は直立壁構造のままとした。これは, 直立壁構造の代わりに消波材を設置すると, 水路端よりの反射波は低減できるものの, 消波材による曝気効果が現れ, 正確なDOの回復実験を実施することが難しくなると考えたからである。

水路には, 堤体下部通水部で発生する平均流による堤

体前後の水位差をなるべく小さくするために, 水路を2分するように隔壁を設け, 水槽端部と中央部付近に通水のための切り欠き溝(幅25cm×高さ10cm)を設け, 全体的に回流できるような水路構造とした。これは, 後述するように堤体構造が海水交換型であり, 堤体の前後で水位差などが生じないようにするためである。

(2) 模型堤体

実験では, 図-2に示す2種類の傾斜版列防波堤とカーテン防波堤を用いた。図-2(a)に示す堤体(以下, DOWN-FIN模型)は, 著者らの従来の研究(中村ら, 2006)において効果的な断面として推奨したものを用い, 堤体下部の通水部高さ dt を大きくした構造に相当する。これに対して図-2(b)に示す堤体(以下, UP-FIN模型)は, DOWN-FIN模型において前面壁の傾斜版列の向きを上向きにした構造に相当する。なお, 図-2(c)に示すカーテン防波堤は, 消波対象波(現地換算で7.2s程度)に対してDOWN-FIN模型とほぼ同程度の透過波の制御機能を持つように吃水深等の断面の設定を行った。このとき, 模型縮尺はいずれも1/40程度を想定した。

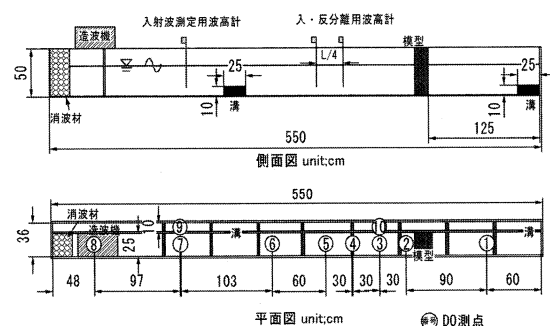


図-1 実験水槽およびDO測定位置

1 正会員 工博 愛媛大学大学院准教授 理工学研究科
2 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻

3. 模型の縮尺効果の影響

本実験で想定した模型縮尺は1/40と、従来の著者ら（中村ら，2006）による実験で用いた1/20と比較すると、かなり小型の模型を想定した実験に相当しており、これに伴う模型縮尺の効果の影響が懸念される。ここでは、本実験と従来の研究（中村ら，2006）での実験による反射率に着目して、最初に模型の縮尺効果の影響を検討してみた。また、気泡連行の状況についても、画像解析ソフトを利用して、おおまかな比較検討を行った。

(1) 従来の研究による傾斜版列防波堤の水理特性

傾斜版列防波堤に関する従来の研究では、実験において中規模程度の造波水槽（長さ 30m×幅 1.0m×高さ 1.25m）が使用されている。このときの模型縮尺は 1/20 であり、使用されている傾斜版列防波堤の模型の諸元は、図-2(a), (b)に示す寸法のはば2倍に相当している。設置水深や吃水深なども、やはり2倍のものが使用されている。

図-4は、このときのDOWN-FIN模型における反射率 Cr 、透過率 Ct の実験結果を示すもので、周期を表すパラメータである L/B (波長堤幅比) による変化で表してある。図中には、渦流れ等に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮する減衰波理論（中村ら，1997）に基づく算定結果も併せ示されており、算定では等価線形抵抗係数 $fc=0.35$ が用いられている。

反射率 Cr は、実験結果と算定結果ともに $L/B=10$ 付近で極小値を示すなど、両結果の対応は比較的良好なことが確認できる。反射率が極小値を示す理由として、遊水室内のピストンモードの波浪共振による渦流れの増大現象が指摘されている。また、透過率 Ct についても実験結果と算定結果の対応はある程度見られ、反射率が極小となる $L/B=10$ 付近で $Ct=0.2$ 程度と波の遮断効果にも優れるようである。

また、従来の研究の成果では、海水交換機能についても検討されており、没水平版下部の通水部を介して沖向きへの平均輸送流量が現れることが確認されている。

(2) 反射率に着目した模型縮尺効果

本実験で使用した水槽は、図-1に示すように、堤体の岸側部分の水路長が短く、しかも消波工を設置していないことから、透過波が反復反射して部分重複波となるため、透過波高の正確な測定が困難である。このため、今回は反射率に着目して、2つの異なる模型縮尺での実験結果の比較検討を行ってみた。

図-5はこの反射率の比較を示す。図中には、参照のため算定結果についても併せ示す。縮尺1/40の本実験結果は、従来の縮尺1/20の実験結果と比較して、多少ながら大きくなることが認められる。しかし、反射率が極小と

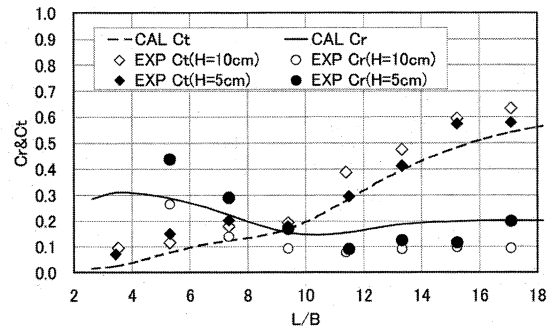


図-4 DOWN-FIN模型の反射率 Cr と透過率 Ct
(模型縮尺 $S=1/20$ 、算定での $fc=0.35$)

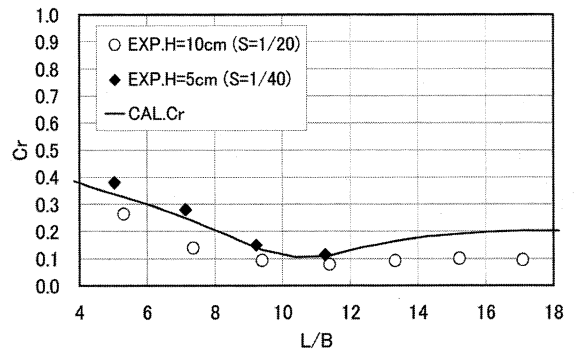


図-5 DOWN-FIN模型における $S=1/20$ と $S=1/40$
のときの反射率 Cr の比較 (算定での $fc=0.35$)

なる周期帯では、両スケールでの実験結果にそれほど大きな差異は見られず、模型の縮尺効果による影響はほとんど認められない。

一方、写真-1は、波と傾斜版列の干渉による気泡の連行状況の比較を2つの異なる縮尺模型について示す。これらの写真は、現地波に換算したときに同一の波条件となるように、また時間位相についてもほぼ同一時点となるように選定してある。

本来、連行気泡は表面張力の作用により球状になりやすく、3次元的な挙動を呈す。このため、側方からの撮影画像の解析による気泡量の把握は非常に困難であり、あくまでも定性的な評価しか行えないものと考えている。このような不確定性を考慮して写真-1を見ても、遊水室内で白色に映える気泡の領域は、縮尺 $S=1/20$ の模型の場合の方が大きく、明確な差異が認められる。これは、やはり気泡の連行現象に及ぼす流体粘性の影響や表面張力の影響などによるものと推定されるが定かでない。

試しに、写真-1で示す2つの異なる縮尺の模型実験で観測されたビデオ画像を対象にして、PIV画像解析を用いて白色に映える気泡領域の割合を解析してみた。この

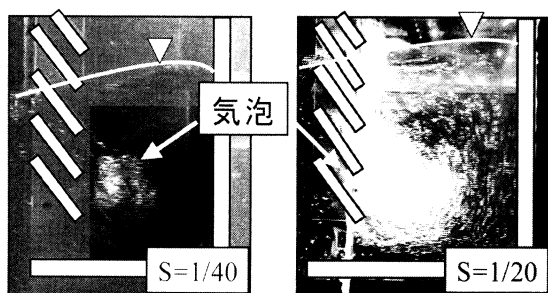


写真-1 遊水室内の気泡の連行状況 (左図: $S=1/40$, $L/B=11.3$, $H=5\text{cm}$, 右図: $S=1/20$, $L/B=11.4$, $H=10\text{cm}$)

結果によると、遊水室内水塊量と連行気泡量との面積比率は、 $1/40$ 縮尺では7%程度、 $1/20$ 縮尺では30%程度と大きな差が見られ、目視による判定とほぼ対応していた。

いずれにしても、波と傾斜版列の干渉による気泡の連行現象に関しては、何らかの模型縮尺の効果が認められ、小模型を用いた実験による定量的な評価は難しいと判断される。そして、気泡の連行現象に関する模型則および模型縮尺の効果に関する検討は、今後続く研究課題としたい。

4. 連行気泡量

ここでは、傾斜版列の向きや波高・周期による連行気泡量の変化について検討する。この際、断面2次元的な画像解析装置を用いて連行気泡の遊水室内水塊量に対する面積率などを観測した。なお、模型の縮尺効果の所で述べたように、この断面2次元的な画像解析による結果は、気泡の3次元性や模型則に関する不確定性を考慮すると、定量的な評価は難しく、あくまでも定性的で相対的な比較に限定せざるを得ない。

図-6は、DOWN-FIN模型とUP-FIN模型における連行気泡量の実験結果を L/B (波長堤体幅比)による変化で示す。図中では、測定有効波数にわたる連行気泡面積の時間平均値 A^* (以下、平均泡面積)について示す。平均泡面積

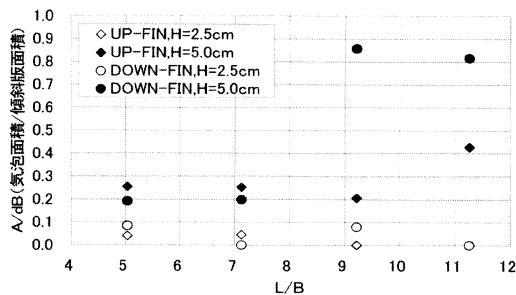


図-6 DOWN-FIN模型とUP-FIN模型の連行気泡量 A^*

A^* は、観測された連行気泡の総面積 A を傾斜版列1枚分の射影面積 $d \times B$ で無次元化したものである。

この図より、短周期側ではさほど平均泡面積に違いはみられないが、長周期側ではDOWN-FIN模型のほうがUP-FIN模型より大きく、有意な差が認められるようになる。これは、DOWN-FIN模型の方が流出しにくい版列構造のため、版列間の流速が大きく気泡を含みやすいことや気泡が遊水室内に滞留しやすいことによると考えられる。

また、遊水室内のピストンモードの波浪共振が顕著になる波周期、すなわち反射率が一旦極小値を示す条件では気泡が連行されやすいことが分かる。なお、波高 $H=2.5\text{cm}$ と小波高の条件では、いくつかの周期条件で気泡の発生が確認できないという結果になった。これは、撮影で使ったCCDカメラでは分解能が十分でなく微細な気泡を観測することができなかったことによる。目視による観測では、このような条件下でも微細な気泡の発生していることが確認されており、画像精度の観点からも、模型縮尺を適切に設定する必要があると考えられる。

5. 溶存酸素濃度(DO)の回復効果

図-7~10は、作用波数によるDOの初期状態からの回復度を示す。図中では、次式の無次元溶存酸素濃度 C^* で表示してある。

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \quad (1)$$

ここに、 C :各作用波数時での溶存酸素濃度(mg/l)、 C_0 :初期溶存酸素濃度(mg/l)、 C_s :実験時水温での飽和溶存酸素濃度(mg/l)である。

図-7は、 $T=1.15\text{s}$, $H=2.5\text{cm}$ の条件下でのDOWN-FIN模型における主水路側の各測点毎のDO回復実験の結果を示す。このとき、各測点において上層と下層でDOにあまり差がみられなかったため、実験結果には上層と下層を平均した値を用いた。この図より、DO濃度は作用波数に伴い回復が少し緩やかになり、9000波程度で飽和濃

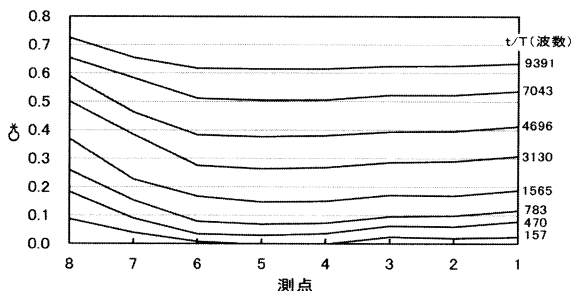
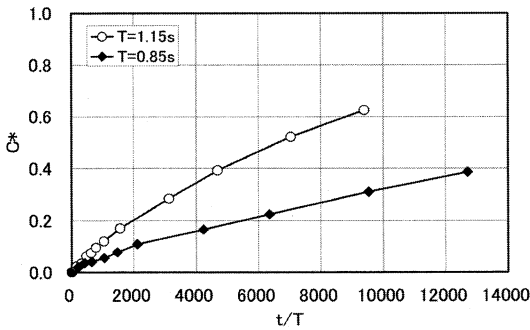
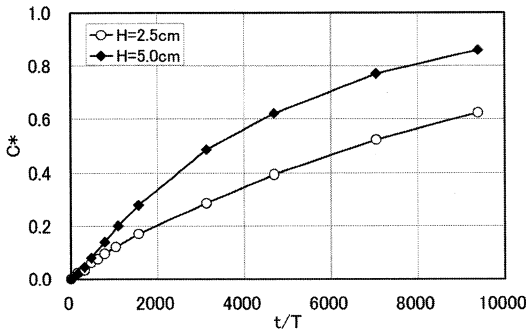
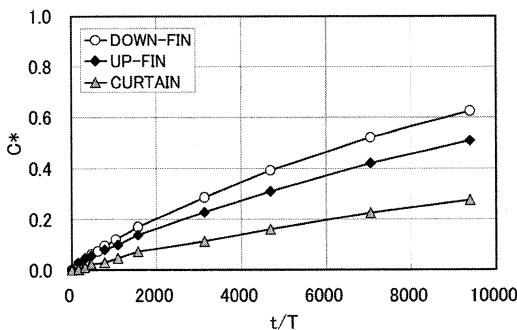


図-7 各測点でのDOの回復効果
($T=1.15\text{s}$, $H=2.5\text{cm}$)

図-8 周期によるDOの回復度合いの比較 ($H=2.5\text{cm}$)図-9 波高によるDOの回復度合いの比較 ($T=1.15\text{s}$)図-10 堤体によるDOの回復度合いの比較
($T=1.15\text{s}$, $H=2.5\text{cm}$)

度の6割程度まで回復することが確認できる。また、造波機付近である測点7,8では、他と比べてDO回復が早いことがわかる。これは、造波機の振動による水塊運動の促進や造波機背後の消波材と波の干渉作用がDO濃度の回復に寄与したためと考えられる。そして、測点7,8を除けば、残りの測点でのDO濃度の差異は小さいことが認められる。このため、図-8~10についてはDO濃度の測点の代表として測点3(模型堤体の沖側)の結果を示す。

(1) 周期と波高によるDO回復効果の比較

図-8は、DOWN-FIN模型における $H=2.5\text{cm}$ のときの実験結果を作用波数(経過時間 t /設定周期 T)による変化

で示したもので、それぞれ周期 T が $T=0.85\text{s}$, 1.15s のものである。DO回復度は、作用波数が増加するにつれて $T=1.15\text{s}$ の方が大きくなっていることがわかる。これは、 $T=1.15\text{s}$ が遊水室内のピストンモード波浪共振の生起する周期条件に相当するためと考えられる。

一方、図-9は、DOWN-FIN模型において $T=1.15\text{s}$ と固定して、入射波高 H を 2.5cm , 5.0cm としたときの比較を示す。DO回復度は、作用波数が増加するにつれて $H=5\text{cm}$ のときに大きくなることがわかる。これは、 $H=5\text{cm}$ の条件で気泡連行がより顕著で、効率的にDOの回復がなされたものと推測される。

(2) 堤体形状によるDO回復効果の比較

図-10は、DOWN-FIN模型とUP-FIN模型およびカーテン型防波堤における $T=1.15\text{s}$, $H=2.5\text{cm}$ のときの実験結果を作用波数 t/T による変化で示す。DO濃度は、DOWN-FIN模型が最も有効に回復しており、最終的にはカーテン型防波堤の2倍ほどのDO回復度を示す。これは、傾斜版列防波堤がカーテン型防波堤に比べ、版列間の曝気効果が大きいことや、遊水室内のピストンモード波動運動の効果によると考えられる。DOWN-FIN模型とUP-FIN模型でDO回復度に差がみられるのは、DOWN-FIN模型のほうが遊水室内のピストンモードの波浪共振が強いことによると推測される。

6. 結語

(1)DOWN-FIN模型とUP-FIN模型による連行気泡量を比較すると、DOWN-FINの方がより気泡を水中に連行しやすい壁構造である。また遊水室内のピストンモードの波浪共振が増大する波周期に相当する反射率が極小値付近で気泡が連行されやすい。

(2)溶存酸素の回復には、DOWN-FIN模型が最も効果的であり、波浪制御効果も踏まえると最も優れた構造形式と考えられる。

(3)波と傾斜版列防波堤の干渉による気泡の連行現象には模型の縮尺効果が見られ、縮尺比の大きな小模型で気泡連行量は減少する傾向にある。この縮尺効果については、模型則を含めて今後の検討課題である。

参考文献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1974):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.278, pp. 3-24.
- 中村孝幸・井手善彦(1997):波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法,海洋開発論文集,第13巻, pp. 177-182.
- 植本一徳・中村孝幸(2006):傾斜版列を有する遊水室海水交換防波堤の効果について,海岸工学論文集,第53巻, pp. 696-700.