

エアレーション促進機能を併せ持つ 反射波低減工の開発

DEVELOPMENT OF A CURTAIN-WALLED REFLECTION WAVE DISSIPATER WITH AERATION ACTIVATION FUNCTIONS

中村孝幸¹・佐藤茂樹²・小林明夫²・小野塚孝³・久保田二郎⁴
Takayuki NAKANURA, Shigeki SATO, Akio KOBAYASHI, Takashi ONOZUKA
and Jiro KUBOTA

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

²正会員 みらい建設工業株式会社 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町 2-31-1)

³正会員 ㈱三柱 (〒135-0034 東京都江東区永代一丁目 3-4)

⁴学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

In harbors, the sheltered water basin from wave actions is usually required for berthing ships safely to piers. However, the construction of harbor breakwaters for the basin tranquility may be responsible for reducing seawater circulations in the basin and often causes the difficulty of seawater exchange between the inside and outside harbor.

In this study, in order to improve the seawater quality in a harbor, a new type of reflection wave dissipater from piers and sea walls is developed. Especially, for activating the aeration of basin water, we have used wave interaction process with the dissipater to activate the aeration of the basin water. The piston mode wave resonance in the water chamber of the dissipater is a main driving force to activate the entrapment and diffusion of air bubbles to the water. Both the functions of wave energy dissipation and activation of the aeration by a new dissipater are examined experimentally and theoretically.

Key Words: reflection wave dissipater, piston mode wave resonance, aeration, entrapped air

1. はじめに

近年, 閉鎖性の強い内湾などで, 人口の増加や産業活動の活性化に伴う富栄養化などにより, 海域の水質汚濁や貧酸素化が問題視されている. 本研究は, このような海域の水質改善のみならず, 沿岸域の防災機能をも併せ持つ防波構造物の開発を目指す.

本研究で対象にした防波構造物は, 護岸や防波堤に利用されている反射波低減工である. 既に著者らの中の一人は, 比較的長周期の波に対する反射波の低減効果に優れる, 垂下版式反射波低減工を提案した¹⁾. これは, 水面付近のみを遮断する垂下版を設けることにより, 遊水室内でピストンモードとよばれる水面変動を励起させ, 版下端部に強い渦流を生成させることで波浪エネルギーを低減させる方式である.

ここではこのような低反射工を基本形として, 周辺海域のエアレーションをも促進する構造体の開発を進める. 具体的には図-1 に代表例を示すように, 遊水室を二箇所に設け, 反射波の低減に有効な周期

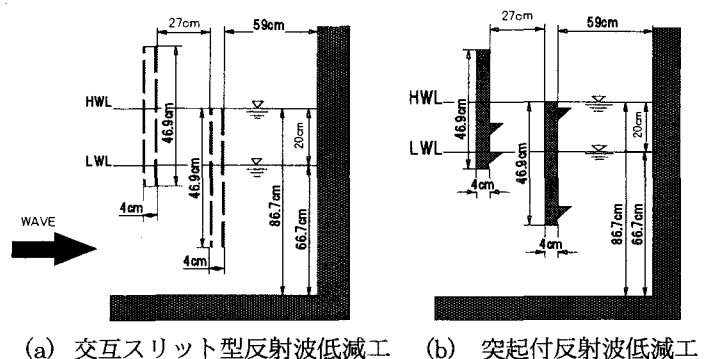


図-1 堤体断面形状

帯を拡大するとともに, 二つの遊水室のピストンモード波浪共振に伴う版下端部での強い渦流の発生による気泡の連行作用および渦による拡散・混合作用を利用して周辺海域のエアレーションを促進する.

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体

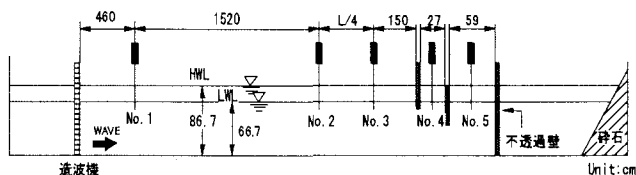


図-2 実験水槽

エアレーションを促進させるためには、まず構造物と波との干渉により、できるだけ多くの気泡を水中に混入あるいは連行することが必要になると考えられる。図-1に示す2つのモデルはその代表例である。これらの例では、入射方向から見て二枚目の垂下版の天端高さは、両モデル共に高潮位 (H.W.L) に一致するように設定してあり、遊水室内のピストンモードの波動運動の励起に伴い容易に越流が生じ、結果的に気泡連行が促進されやすい構造としてある。

また垂下版の構造も図-1 (a) のようにスリット壁や、(b) のように突起付きの壁としてある。これらは、水面が上昇・下降するとき水面に擾乱が発生しやすく、気泡連行が生じやすくなるためである。

そして、いずれのモデルでも、遊水室内のピストンモードの波動運動の励起に伴い壁下端部に渦が形成されやすく、渦の低圧部を利用して水面近くの気泡を水底近くまで誘引する効果が期待できる。

また、両モデル共に壁の内部は空洞としてあり、その中の気泡を含む水塊が壁下端の渦に向かって吸い込まれやすい構造としてある。スリット孔を垂下版の前後に交互に配置したのは、潮位に関係なくスリット孔から越流を生じさせるためや遊水室内のピストンモード波動運動の励起度合を低下させないためである。

実験で想定した模型の相似則は、フルードの相似則でその縮尺は 1/7.5 とした。本実験では、気泡の連行現象など流体力学的に未解明な現象を含むため、必ずしもフルードの相似則が成立しないと考えられるが、一応の目安として用いた。

(2) 実験装置および実験方法

a) 実験水槽：実験で用いた水槽は、図-2で示す長さ 28m、幅 1m、高さ 1.25m の 2 次元水槽である。この水槽の一端には造波装置が、他端には碎石からなる勾配 1/5 の消波工が設置されている。

b) 反射波および堤内波高：実験では、図-2に示すように計 5 本の波高計を用いて、入射波、反射波、堤内波高が求められるようにした。反射波の推定には、入・反射波の分離推定法を用いた。

c) 連行気泡量：堤体と波との干渉による連行気泡量を定量的に把握するため、図-3に概略的に示すよう

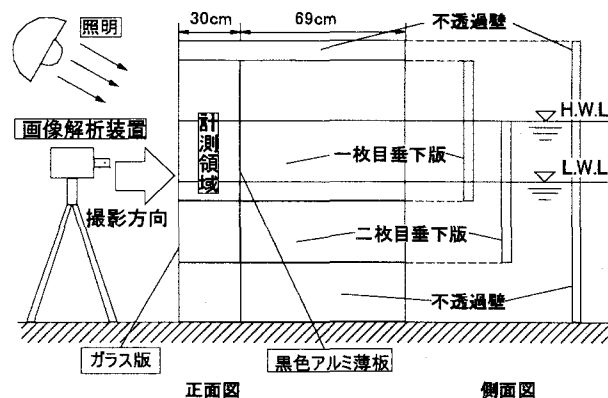


図-3 連行気泡量測定実験の状況

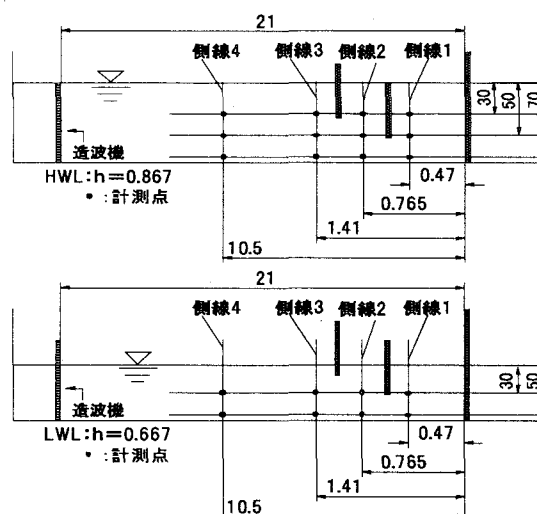


図-4 D0 回復実験での測定位置(unit.:m)

表-1 実験条件

case No.	1	2	3	4
堤体形状	交互スリット型		突起付	
水深h(cm)	86.7	66.7	86.7	66.7
波高H(cm)	周期1.0sまで7cm、それ以降は7cmと13cm			
周期T	0.9~2.2sまでの範囲で10条件			

に画像解析装置を用いた測定を実施した。この画像解析装置は、撮影領域に含まれる白色画像の面積と個数を実時間で出力できる能力を有している。

連行気泡を測定する際、まず図-3に示すように模型部分のみを水槽の幅方向に二分するように黒色背景のアルミ薄板(3mm)を挿入した。このとき、連行気泡の出現が 3 次元的な現象となることから、2 次元画像解析による誤差がなるべく小さくなるように、30cm 幅で区分された黒色アルミ薄板と水槽ガラス壁の間を解析対象領域の奥行き幅とした。しかし、撮影対象の 30cm 幅の範囲内でもやはり気泡画像の重なりや分離などが生じ、精確さに欠けることになるが、ここではこのような条件下で観測された 2 次元的な気泡の画像データの結果をもって連行気泡量

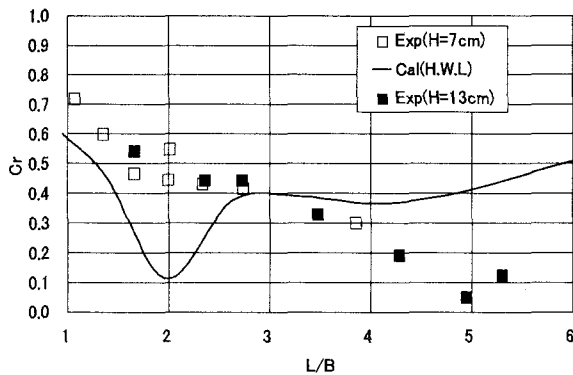


図-5 交互スリット型反射波低減工の反射率 ($h=86.7\text{cm(H.W.L.)}$)

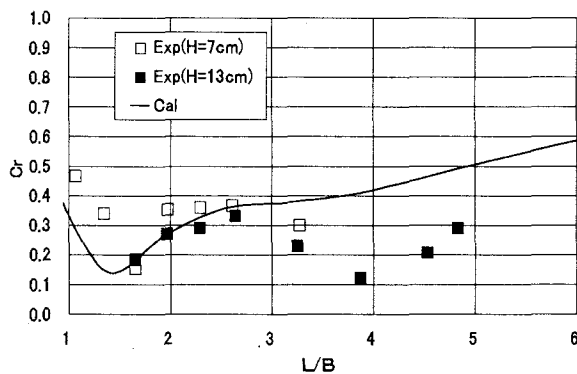


図-6 交互スリット型反射波低減工の反射率 ($h=66.7\text{cm(L.W.L.)}$)

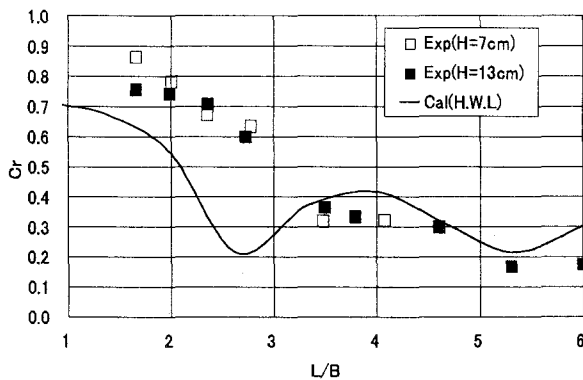


図-7 突起付反射波低減工の反射率 ($h=86.7\text{cm(H.W.L.)}$)

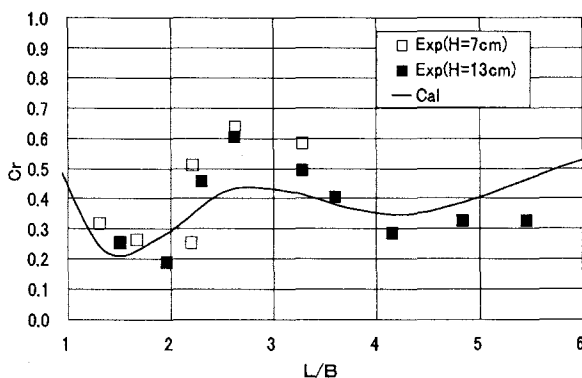


図-8 突起付反射波低減工の反射率 ($h=66.7\text{cm(L.W.L.)}$)

の大小の指標とした。なお、

画像解析装置には、KEYENCE 社製の高速・高精度画像処理システム XV-1000 を用いた。

d) 溶存酸素濃度の回復実験：この実験では、上記した気泡連行に伴う曝気効果により、溶存酸素濃度(以下 D0 と略す)の回復度合いを定量的に把握した。

この回復実験では、造波する前に、亜硫酸ナトリウムを使用して水槽内の D0 を 1.0mg/l 以下となるように調整した。その後、水槽内で波を作用させて図-4 に示す岸沖方向に異なる 4 測線で D0 を測定した。このとき、水深方向には上層、中層、下層(水深が L.W.L. のときは上層、下層のみ)で測定した。なお、D0 測定には、HORIBA 社製の水質チェッカー U-10 を用いた。

また、比較実験として、直立反射壁のみとした状態でも D0 を測定した。

実験での D0 測定は、波を作用させる直前に 1 回、作用させてから 30 分ごとに 3 回、その後 60 分ごとに 2 回ほど行い、全計測時間は 3 時間 30 分とした。

e) 実験条件：実験で用いた水深 h は、各堤体について H.W.L. ($h=86.7\text{cm}$) と L.W.L. ($h=66.7\text{cm}$) の 2 条件とした。堤体に作用させた波の条件は、表-1 に示すものを用いた。

3. 反射率

(1) 交互スリット型反射波低減工

図-5, 6 は、それぞれ高潮位、低潮位のときの交互スリット壁堤の反射率 Cr の結果を波長・堤体幅比 L/B の変化で示す。図中には、中村ら²⁾による減衰波理論による算定結果も併せ示す。反射率の実験結果は、 L/B の大きな長周期になるほど低下する傾向にあることがわかる。そして、高潮位では、理論算定で予測される $L/B=2$ 付近の極小反射の傾向が実験結果で見られないことや、潮位に関係なく $L/B=3$ 以上の長周期条件で実験と理論の結果が一致しないなどの差異がある。これは、入射波方向から見て 2 枚目の垂下版上端からの越流や、スリット孔からの水塊の流出などによるエネルギー逸散が線形理論である減衰波理論では評価できないことによると考えられる。しかしながら、反射率の実験結果は、全体的に見ると、 $Cr=0.5$ 以下をほぼ維持しており、広い周期帯にわたり反射波が低減できていることが分かる。

b) 突起付反射波低減工

図-7, 8 は、やはり高潮位、低潮位のときの突起付堤体の反射率を示す。低潮位に対する反射率は全体的に低い状態にあるが、高潮位においては $L/B < 3$ の短周期の条件で高い傾向にある。これは、壁構造が不透透であることによると考えられる。

そして、越流の生じやすい高潮位になると、交互

スリット型反射波低減工の場合と同じように、実験結果と算定結果との差異が見られるようになる。

以上の検討から、交互スリット壁堤は潮位に関係なく安定した反射波低減効果が発揮できるなどより優れた低減工と判定される。

4. 気泡の連行効果

以下、画像解析装置で計測した連行気泡面積 A は、相対的な比較が行えるように、式(1)で定義される無次元気泡面積率 A^* で表現した。

$$A^* = \frac{A}{B_1 d_1 + B_2 d_2} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 B_1 、 B_2 ：入射方向から見てそれぞれ前後の遊水室の幅、 d_1 、 d_2 ：前後の垂下版の吃水深である。

(1) 交互スリット型反射波低減工

図-9、10は、この場合の連行気泡量の結果を示すもので、無次元気泡面積率 A^* の波長・堤体幅比 L/B による変化で表す。実験では、総気泡断面積の時間的な変化が測定できることから、その極大値と時間平均の両者について検討した。

これらの図から、連行気泡量の割合は入射波高が大きいほど増大することや、ピストンモードによる遊水室内の波高変動が大きくなる周期帯で増大することが分かる。しかし、その絶対値は比較的小さく現れている。

このように絶対値が小さく現れた理由としては、引き込まれた気泡の径が比較的小さいことやその大部分がスリット孔付近で発生する小規模渦により、垂下版内の空洞に吸い込まれることが目視観測で確認されており、画像解析装置による計測が困難であることや、装置による認識が難しいことなどによると考えられる。

また、別途に実施した流れの可視化実験により、垂下版内の気泡混入水塊は垂下版下端で発生する大規模渦によって水底近くまで引き込まれ、長時間水中に滞在することも確認されている。

(2) 突起付反射波低減工

この場合の結果を同様にして、図-11、12に示す。高潮位るとき、連行気泡量の割合は、比較的高周期の条件下で増大する傾向にある。これは、第二遊水室内でピストンモード波浪共振が発生し、第二垂下版上端からの越流が顕著になるためと考えられる。

また、低潮位るときには、前側遊水室内の突起が水面近くにあるため、前側遊水室内でのピストンモ

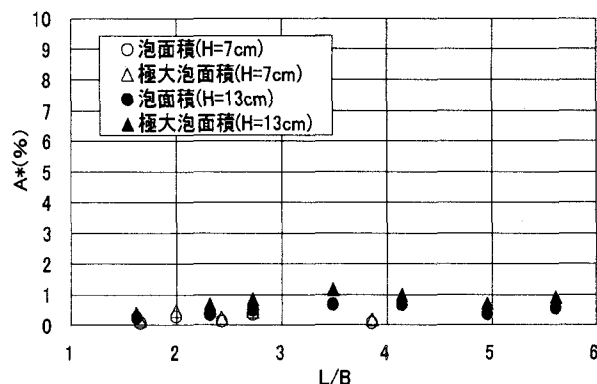


図-9 交互スリット型反射波低減工の気泡連行量
($h=86.7\text{cm}$ (H.W.L.))

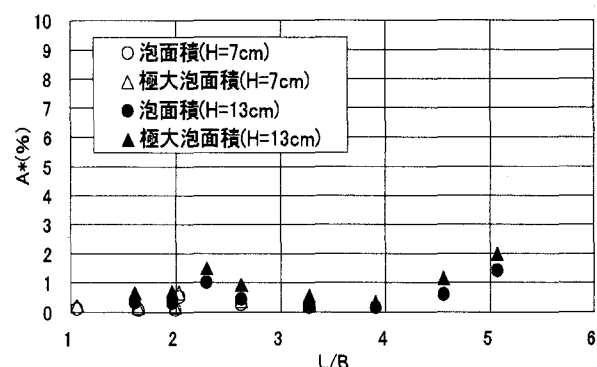


図-10 交互スリット型反射波低減工の気泡連行量
($h=66.7\text{cm}$ (L.W.L.))

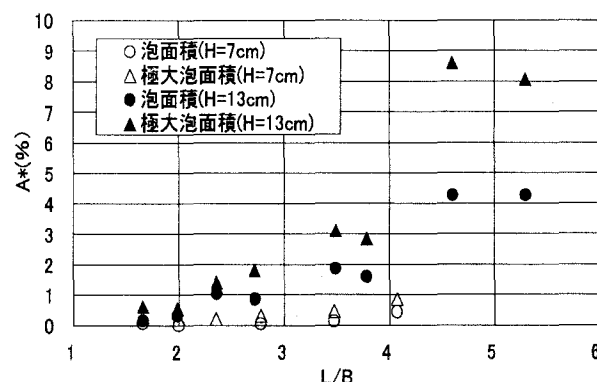


図-11 突起付反射波低減工の気泡連行量
($h=86.7\text{cm}$ (H.W.L.))

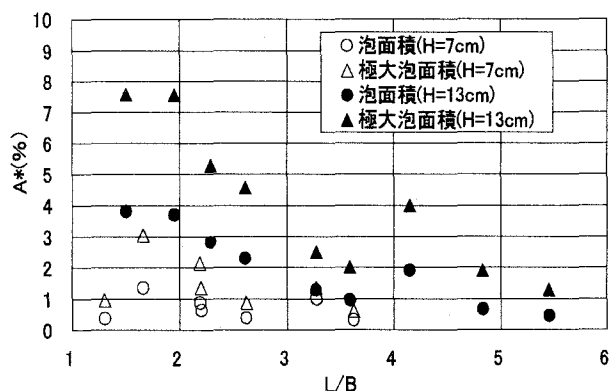


図-12 突起付反射波低減工の気泡連行量
($h=66.7\text{cm}$ (L.W.L.))

ードが卓越する比較的短周期のときに気泡量が増大する傾向が見られる。

この堤体では、上記のスリット壁堤に比較すると、気泡面積の割合が大きく現れているが、これは個々の気泡径が大きく画像解析装置で認識されやすいことや壁体側部にスリット孔がないことなどによると考えられる。この堤体による連行気泡の特徴としては、その大部分が越流や波面と突起との衝突によるもので、比較的径が大きく水面付近に発生・滞在する傾向が強いことが挙げられる。そのため垂下版下端の大規模渦まで混入されにくく、気泡径も比較的大きいことから再度水面に上昇する傾向が強い。

5. 溶存酸素濃度(DO)の回復実験の結果

(1) 堤体条件と DO の回復指標

ここでは、試行的に交互スリット型反射波低減工を用いて実施した再曝気実験の結果を紹介する。この堤体は、上記で検討したように、潮位に関係なく、良好な反射波低減効果が期待できる。

なお、このとき用いた波条件は、遊水室内のピストンモード共振による波高増大が顕著になる周期を選択してある。

各時点、各場所で測定した DO は、角野ら³⁾の研究を参考にして式(2)による無次元溶存酸素濃度 C^* で表示した。

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \quad (2)$$

ここに、 C : 測定した DO 値、 C_s : 飽和溶存酸素濃度、 C_0 : 初期溶存酸素濃度である。

(2) 実験結果

図-13, 14は、それぞれ交互スリット壁堤と比較のための直立堤に対する DO の回復実験の代表的な結果を示す。図中では、図-4で示す測線別に経過時間に伴う DO の回復割合が判定できるように測線毎に図が作製してある、なお、経過時間は作用波数(経過時間 t /実験周期 T)に換算してある。

交互スリット壁堤の結果を示す図-13から、DO の回復度は、当然のことながら、堤体近傍で早く、それより離れるに従って遅くなることが分かる。しかしながら、上層と下層など鉛直方向の差異はほとんど見られない。また、DO は、作用波数に伴いほぼ放物線状に回復する傾向が見られ、10000 波程度の作用後に飽和濃度の 7 割程度まで回復することも認められる。

一方、直立堤では、交互スリット壁堤に比較すると、その回復度はかなり緩慢で、場所的な変化もほとんど見られない。これは、DO の回復が主に波の上

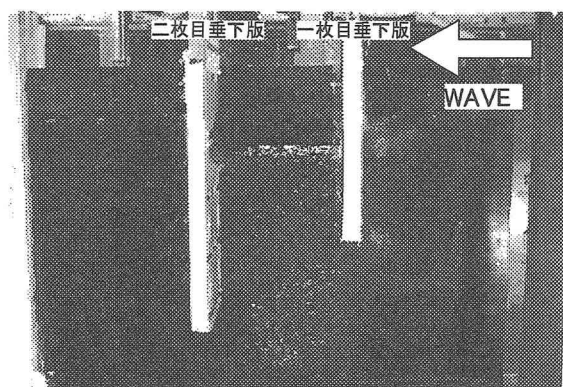


写真-1 連行気泡の状況
($T=1.3s$, $H=13cm$, $H.W.L=86.7cm$)

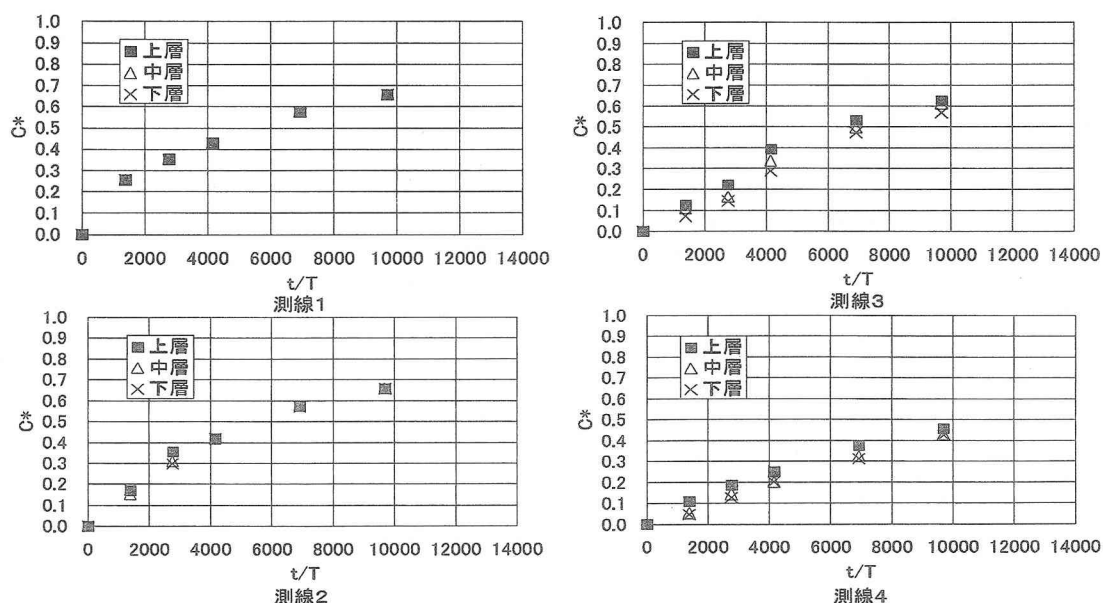


図-13 交互スリット型反射波低減工の DO 回復効果
($T=1.3s$, $H=13cm$, $H.W.L$, $L/B=2.7$)

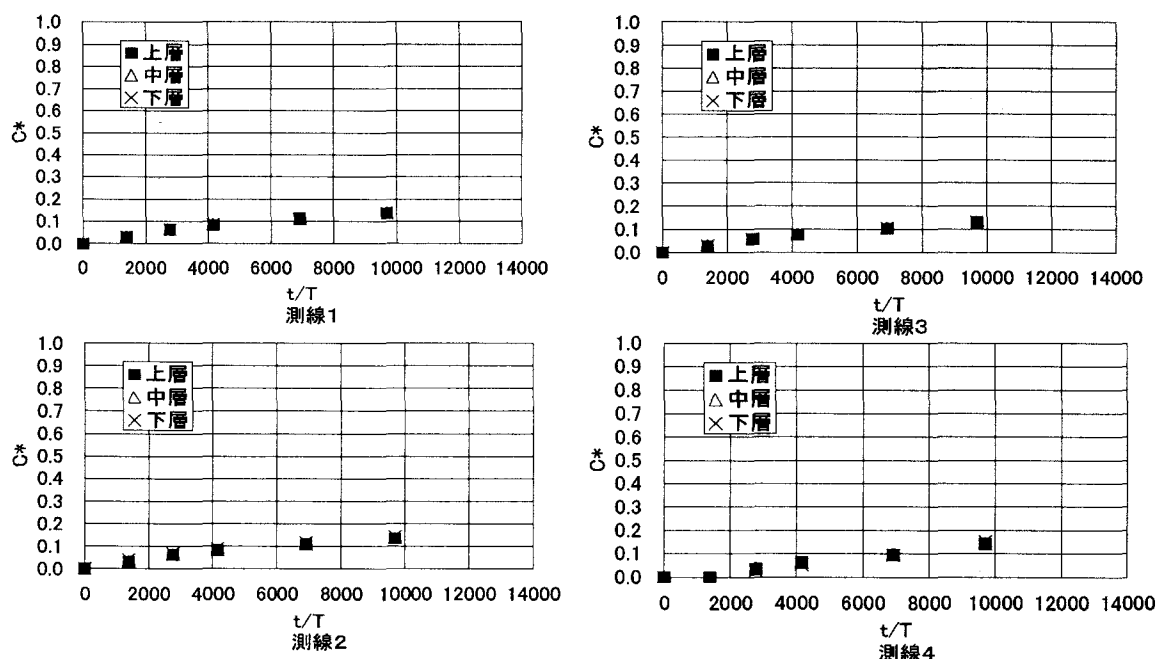


図-1 4 直立反射壁のみの DO 回復効果
($T=1.3s$, $H=13cm$, $H.W.L$, $L/B=2.7$)

下動に伴い水面付近で生じることによるためと考えられ、交互スリット壁堤と直立堤の DO 回復度の差が交互スリット壁堤単独の曝気効果と判定される。

図-1 3 の結果に対応する波条件は、波長・堤体幅比 $L/B=2.7$ で、前側遊水室内でのピストンモード共振による波高増大が顕著になる条件に相当している。このため、入射方向から見て第 1 番目の垂下版の下部で強い渦が発生することが確認されており、この渦により気泡が取り込まれ、渦の移動・掃き出しに伴い拡散され、効率的に DO の回復に寄与したと推測される。

本研究では、その他の波条件についても上記と同様に DO 回復度を測定しているが、垂下版上端よりの越流現象のみによる気泡連行だけでは DO の回復につながらないことや、DO を効率よく回復させるためには、写真-1 の例に見られるように、気泡が垂下版下端部の渦に取り込まれ、長時間水中に滞在する必要があることなどが確認されており、ここに付記しておく。今後は、DO 回復度と渦流れの関係などを定量的に取り扱い、さらに効果的な構造体を究明していきたい。

6. 結語

(1) 二重垂下版式構造の反射波低減工では、垂下版構造を透過型の交互スリット壁にすると、潮位に左右されず広い周期帯にわたり効果的に反射波が低減できる。

(2) 二重垂下版式堤体の垂下版表面に突起を設ける方法および第二垂下版の天端のみを低く設定する方法は、それぞれ波面との衝突現象および越流現象により連行気泡量を増大させるのに有効である。このとき、遊水室内のピストンモード波浪共振による波高増大が密接に関係する。

(3) 垂下版構造を交互スリット壁にする方法は、垂下版表面に突起を設ける方法に比較して連行気泡量は少ないものの、構造的に連行気泡を垂下版下部の渦に引き込む機能に優れ、結果的に渦の拡散作用などにより、溶存酸素濃度を高めるのに有効である。

(4) 溶存酸素濃度を効率よく回復するには、水面よりの連行気泡を水中深く引き込み、長時間留まらせることが重要になることが示唆された。これについては、定量的な検討など今後さらに検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp796-800, 1999.
- 2) 中村孝幸, 井出義彦: 波の逸散現象を考慮した隅角部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, pp177-182, 1997.
- 3) 角野昇八, 小田一紀, 藤田 孝, 天野健次, 貫上佳則: 縦スリット壁式直立消波工のエアレーション機能, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp844-848, 1989.