

多重カーテンウォール型低反射工の 曝気機能に関する研究

STUDY ON MULTI-WALLED REFLECTION WAVE DISSIPATER AND ITS AERATION ACTIVATION FUNCTIONS

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

- 1 正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒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 (〒102-0083 東京都千代田区麹町 1-7)
3 正会員 株式会社 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 recent years, to the bay near a big city, nutrient salt, such as a nitrate and an orthophosphate have flowed in all over seawater because of the increase in population, and industrial activity. And the oxygen in seawater decreases and it has become the environment where marine creatures cannot live easily.

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. 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.

Key Words: reflection wave dissipater, piston mode wave resonance, aeration, multiple-walled curtain

1. はじめに

近年, 大都市近傍の内湾域では, 閉鎖性の強い海域であることに加えて, 人口の増加や産業活動の活性化に伴う窒素やリンなど栄養塩類の流入・堆積などにより, 底層域で貧酸素水塊の発生が見られるようになっている。また, 海域によっては, このような貧酸素水塊が海面付近に湧昇する現象(青潮)も確認されており, 魚類などの海洋生物に壊滅的な打撃を与えている。

そこで本研究では, 湾奥の係留施設として一般的な杭式栈橋を対象にして, 反射波低減効果を発揮でき, しかもその逸散機構を利用して水質改善も可能にする構造体について究明する。

そのために, まず効果的に反射波低減が行える構造体を模索し, その構造体による波のエネルギー消散機構を利用することで, 水質改善として水域の溶存酸素濃度の回復を促進するための曝気機能を高める方策を究明する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体および実験水槽

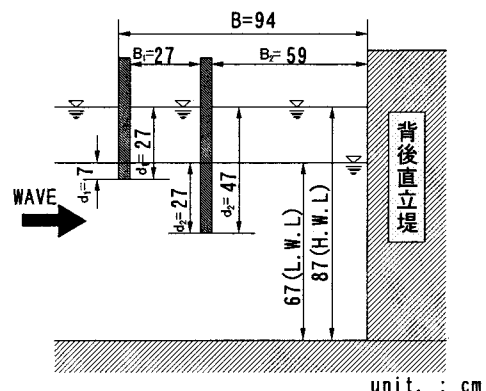


図-1 模型堤体の断面形状

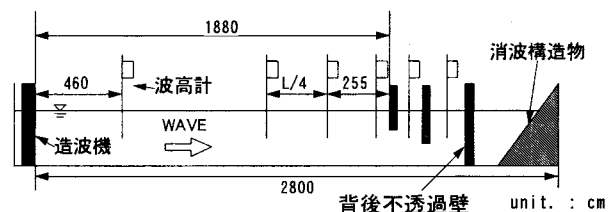


図-2 実験水槽図と模型堤体・波高計の設置状況

本研究では, 広範囲の周期帯の反射波を低減するものとして, 図-1 に示す多重カーテンウォール型低反射

工を提案する。この堤体形状は、著者ら¹⁾が効果的に反射波を低減できる護岸構造物として提案したカーテン式反射波低減工を参考としている。具体的には、背面直立堤などの不透過堤の前面に吃水の異なるカーテン壁を2枚設置することで、堤内遊水室を2箇所設置した形状としている。この構造物に特定周期の波が作用した時、ピストンモードと呼ばれる遊水室内での波浪共振現象が発生し、カーテン壁下端部での渦形成によって波エネルギーを逸散する。多重カーテンウォール型低反射工は2箇所の遊水室内で、異なる2周期条件波によってピストンモードが起こるため、広い周期帯にわたる反射波低減を可能にしている。

本研究では、この壁下端部の渦を利用した気泡の連行及び水塊との攪拌による曝気促進機能についての考察を行う。なお、この模型堤体の縮尺は現地スケールの1/7.5を想定しており、遊水室幅とカーテン壁の吃水深は、現地周期で $T=4s, 6s$ を消波目標周期として、著者ら¹⁾による堤体断面設定法を参照して設定した。

実験水槽は、図-2に示す愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を使用した。この水槽の一端には造波装置が、他端には碎石よりなる勾配1/5の消波工が設置されている。

(2) 実験方法・実験条件

a) 反射率測定実験

本研究では、まず図-1に示す多重カーテンウォール型低反射工の反射率低減特性を実験と理論の両面から明らかにした。実験では、図-2に示すように、水槽中に模型堤体と波高計を設置して、入射波、反射波、堤内波高を測定して反射率 C_r を算定した。反射波の推定には、合田ら²⁾による入・反射波の分離推定法を用いた。なお、実験で用いた水深、波高、周期条件は表-1に示すとおりである。

b) 連行気泡量測定実験

従来から、曝気法として水中に気泡を混入させる方法は多用されている。今回の研究においても、堤体と波との衝突などで発生する気泡は溶存酸素濃度の回復にとって重要な要素であると考えられるので、気泡量（以下連行気泡量と称する）を測定して、D0回復促進効果を考察する上での影響要素のひとつとした。

測定方法としては、堤体まわりの波運動に伴う連行気泡量を定量的に把握するため、模型まわりの気泡の混入状況をキーエンス社製の高速・高精度画像処理システムを用いて撮影し、その画像解析ソフトを利用して気泡断面積を観測した。この測定状況の概略図を図-3に示す。図中に示すように、連行気泡は模型を水槽の幅方向にほぼ1:2に分割した後に短幅水路側において実施した。これは、気泡の連行現象が気泡球として現れるなど3次元的なものであることから、ある程度狭い水路幅に対して側面から撮影を行うことで、気泡球の映像の重なりによる観測誤差を小さくするためである。また、測定水路幅があまり狭過ぎても側壁の摩擦

表-1 反射率・連行気泡量測定実験の実験条件

case No.	1	2
水深 h (cm)	87	67
波高 H (cm)	周期1.1sまで7cm、それ以降は7cmと13cm	
周期 T	1.0～2.6sまでの範囲で20条件	0.8～2.2sまでの範囲で16条件

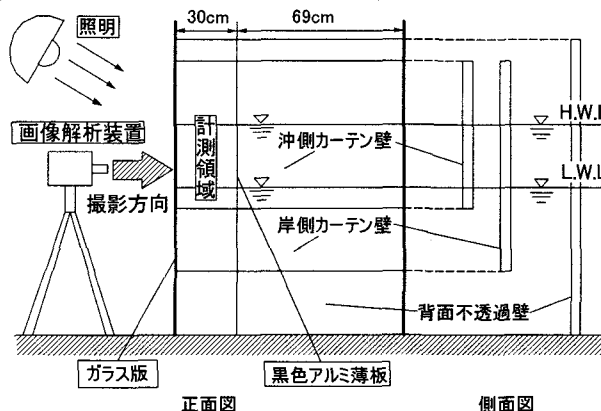
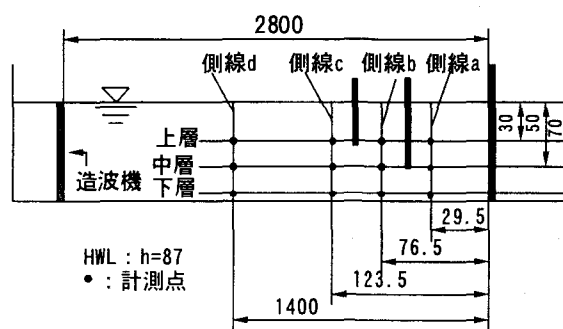
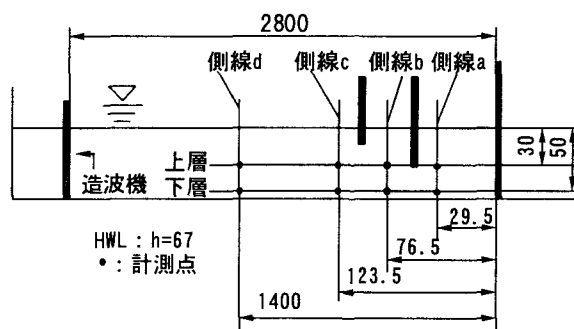


図-3 連行気泡量測定実験の概略図



(1) H. W. L. の D0 測定点



(2) L. W. L. の D0 測定点

図-4 各水深における D0 測定点

せん断力の影響が無視できなくなることなどを勘案して設定した。

画像解析用カメラは水槽側面に設置し、波作用時に発生する気泡を0.1秒ごとに1分間計測した。水路を分割する隔壁には黒色に塗布した厚さ3mmのアルミ板を用い、側面から気泡の数及び大きさが撮影し易いようにした。なお、実験で用いた水深、波高、周期条件は反射率測定実験と同じく表-1に示すとおりである。

c) 溶存酸素濃度測定実験

溶存酸素濃度（以下 DO と略する）測定実験では、ピストンモードで発生する壁下端部渦による水塊攪拌や上記の連行気泡による DO の回復度合を定量的に把握することを目的とした。そのため、この測定実験では造波する前に、亜硫酸ナトリウムと触媒として塩化コバルトを適量投入して水槽内の DO が 1.0mg/l 以下の低酸素水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 DO 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、DO 測定には、HORIBA 社製の水質チェッカー U-10 とワイエスアイ・ナノテック株式会社製の DO メータ YSI Model 550A を用いた。

実験での DO 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。なお実験条件は、実験結果を説明するときに併せて後述する。

3. 実験結果

(1) 反射率

図-5 に水深条件 $h=87\text{cm}$ のときの反射率の測定結果と理論算定値を併せて示す。ここではグラフの横軸を無次元量の波長堤体幅比 (L/B , $B=94\text{cm}$) で表している。図中には、中村ら³⁾による減衰波理論による算定結果も併せ示す。理論算定では、線形抵抗係数 $fc=0.2$ として計算した。

この図から、実験値と理論算定値ともに $L/B=3$ および 6 付近の条件で反射率 Cr の極小値がみられる。これらの周期帯条件では、2 箇所の遊水室内でそれぞれピストンモード波浪共振が起こり、壁下端部で形成された渦によって波エネルギーが逸散されている。これに伴い理論算定値で Cr が 0.5 以下、実験値で 0.6 以下の L/B 条件が $L/B=2.5\sim 8$ と広範囲にわたっている。これは従来のカーテン式反射波低減工に比べ幅広い周期帯の波の反射波を抑えることができることを示している。

また図示は省略するが、水深条件が $h=67\text{cm}$ のときの反射率、波高変動の実験結果も上記のような傾向が見られた。このことから、二つの遊水室内で発生するピストンモード波浪共振は水深変化にも関係無く発生することが確認できた。

(2) 連行気泡量

図-6 は水深条件が L, W, L ($h=67.0\text{cm}$) のときの連行気泡量の測定実験の結果である。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（以下平均泡面積と称する）について示す。観測された連行気泡の面積 A は、波の作用方向から見て 1 枚目のカーテン壁の射影面積 ($=d_1 \cdot B_1$) と 2 枚目のカーテン壁のそれ ($=d_2 \cdot B_2$) の和である総射影面積で無次元化して、百分率で表示してある。具体的には次式のようなである。

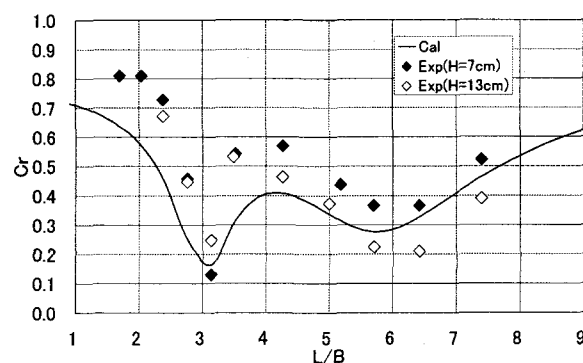


図-5 多重カーテンウォール型低反射工の反射率
(水深 $h=87\text{cm}$, B : 堤体幅 $=94\text{cm}$, $fc=0.2$)

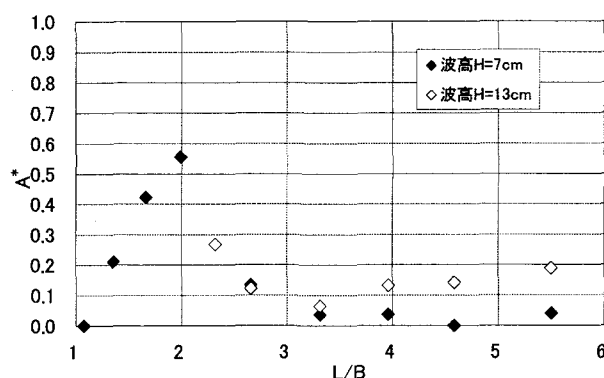


図-6 多重カーテンウォール型低反射工の平均泡面積
(水深 $h=67\text{cm}$, B : 堤体幅 $=94\text{cm}$)

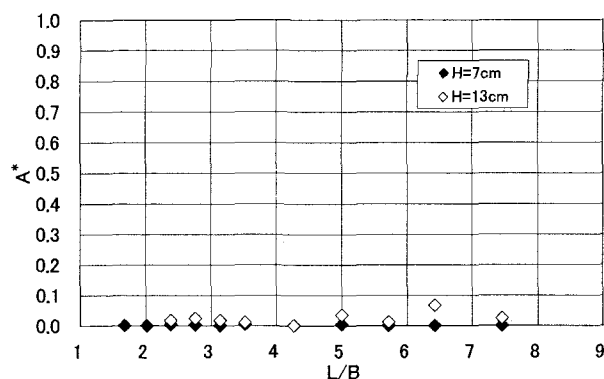


図-7 多重カーテンウォール型低反射工の平均泡面積
(水深 $h=87\text{cm}$, B : 堤体幅 $=94\text{cm}$)

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

ここに、 d_1 , d_2 : 前後の垂下版の吃水深, B_1 , B_2 : 入射方向から見てそれぞれ前後の遊水室の幅である (図-1 参照)。

また、図の横軸は波長堤体幅比 L/B で表す。

図中から、 $L/B=1.9$ の波条件で平均泡面積が極大値を示しているのがわかる。この周期帯条件は、沖側の遊水室内でピストンモードが卓越する周期帯である。このため、遊水室内の水面変動が大きくなり、比較的吃水深が浅い沖側から見て一枚目のカーテン壁の下端

部に水面が潜り込み、水面とカーテン壁下端部が衝突するときに気泡が大量に発生していることが実験状況を記録したビデオ画像などによって確認された。また、主に長周期の周期帯条件で、波高 $H=13\text{cm}$ の条件のときにわずかに気泡が発生しているようである。これは波高が大きいために、周期条件に関係なく沖側から見て一枚目のカーテン壁の下端部に水面が潜り込み、カーテン壁下端部と衝突することが気泡発生の要因である。

また図-7 に示す水深 $h=87\text{cm}$ のときの実験結果は、水深が深く、カーテン壁の吃水深が深くなるため、水面との衝突現象が起こらなくなり、ほとんど気泡が発生しなかった例である。

(3) D0 回復効果

図-8 は、水深条件が $L.W.L(h=67\text{cm})$ のときの D0 測定実験の代表例として、波条件が周期 $T=1.7\text{s}$ ($L/B=3.9$)、波高 $H=13\text{cm}$ のときの実験結果である。また、図-9 は、比較実験として 2 枚のカーテン壁を取り外し、背面不透過壁のみで、波条件を同じくしたときの実験結果を示す。各図中には、各水深の実験結果の平均値を代表量として、測線 a~d ごとの結果を併記している。

図中では、次式による無次元溶存酸素濃度 C^* で表示してある。

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

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。なお、各水温での飽和溶存酸素濃度は理科年表⁴⁾を参照した。また、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。

これらの図から、多重カーテンウォール型低反射工の実験結果は、ピストンモードで発生する壁下端部渦による水塊搅拌や気泡連行効果によって、背面不透過壁のみの場合に比べて最終的な D0 回復量が 2 倍ほどに増加しているのが確認できる。このことから、多重カーテンウォール型低反射工はある程度の曝気促進機能が期待できる堤体形状といえる。

次に連行気泡の効果を調べるために、水深、波高条件を同じくして、連行気泡量が卓越する周期条件である $T=1.1\text{s}$ ($L/B=1.9$) のときの実験結果を図-10 に示す。なお、この周期条件は、図-6 で示す泡面積が極大値を示す条件に対応している。この図から、堤体から最も離れた位置である測線 d の D0 回復速度は遅い傾向にあるものの、作用波数 t/T が 7000 波のときの回復量を図-8 の結果と比較すると、2 倍ほどの回復量であることが分かる。このことから、効率的に D0 を回復させるためには、多くの気泡を水中に連行させることが重要であることが分かった。

そこで次節から、効率よく気泡を水中へ混入させる方法についての検討を行う。具体的には水面の上下運動を利用することで気泡連行を促進させる堤体形状の

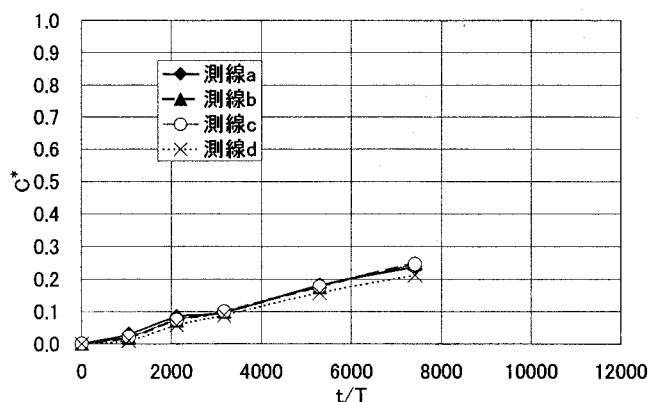


図-8 多重カーテンウォール型低反射工の D0 回復効果
($h=67\text{cm}$, $H=13\text{cm}$, $T=1.7\text{s}$ ($L/B=3.9$))

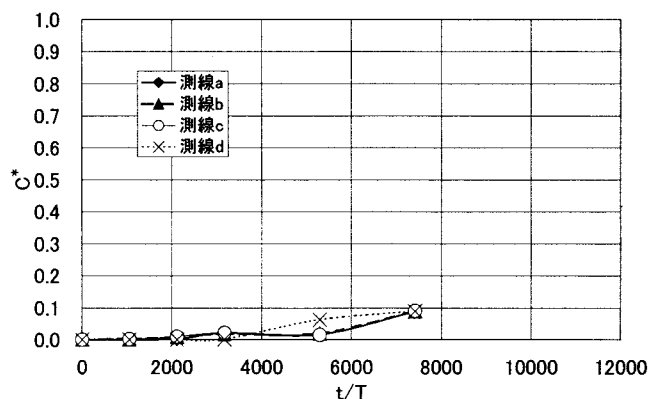


図-9 背面不透過壁の D0 回復効果
($h=67\text{cm}$, $H=13\text{cm}$, $T=1.7\text{s}$ ($L/B=3.9$))

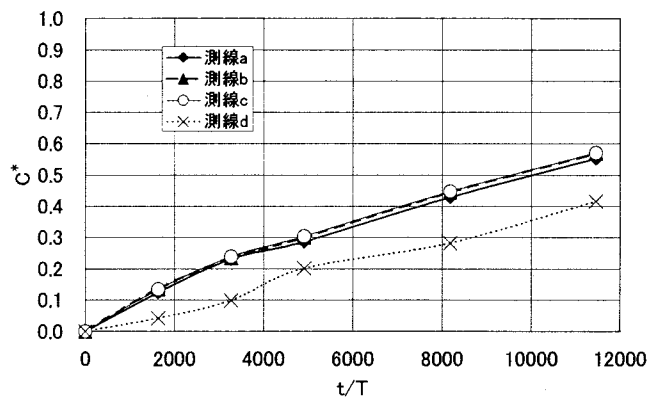


図-10 多重カーテンウォール型低反射工の D0 回復効果
($h=67\text{cm}$, $H=13\text{cm}$, $T=1.1\text{s}$ ($L/B=1.9$))

提案と、その堤体の D0 回復効果について考察を行う。

4. 気泡連行促進型低反射工の効果

本研究では、気泡発生を促進する構造体として図-11 に示す断面形状の低反射工を提案する。なお、以下では気泡連行促進型低反射工と称して説明を行う。この構造体は、カーテン壁面に設置したスリット孔と、波

運動で上下する水面との衝突現象によって、気泡の発生を期待した壁面形状となっている。また沖側から見て2枚目のカーテン壁の天端高をH.W.L.を想定した水面と同位置に設定しており、天端からの越流現象による気泡発生も想定している。以下でこの構造体の反射波低減特性とD0回復効果についての考察を行うが、説明の省略のために水深条件をH.W.L. ($h=87\text{cm}$) に設定して説明する。

(1) 反射率

図-12 は気泡連行促進型低反射工の反射率を示した図である。実験値に注目すると、 $L/B=2.0$ より長周期の条件で反射率 C_r が0.5以下を実現しており、効率よく反射波を低減できる構造体といえる。

しかし、算定結果と実験結果の比較を行ってみると、両結果の間である程度の定性的な一致が見られるものの、理論算定値では $L/B=2.0$ の条件で反射率が極小値を示しているが、実験値ではそれが見られないなど、定量的な一致度は不十分と判定される。これは、用いた算定法が線形理論に基づくものであり、実験で見られるような越流の影響や水面付近にあるスリット孔からの流出入の影響が十分に考慮できないことが主たる原因と考えられる。また、実験結果では、 L/B が大きな長周期側において、算定結果よりも顕著に反射率が低下する傾向が見られる。これは不透過カーテン壁のときの結果を示す図-5の場合と類似して、背後直立壁との間にある第2遊水室のピストンモード波浪共振に起因するエネルギー逸散が増大するためと考えられる。そして、交互スリット壁は透過壁ではあるものの、不透過カーテン壁と類似した作用がある程度は保持されていることが推測できる。

(2) 連行気泡量

図-13 は気泡連行促進型低反射工の連行気泡量測定実験の実験結果である。この図から、広範囲の周期帯条件で気泡が発生していることが確認できる。これは周期条件にかかわらず、水面とスリット孔の衝突現象が起こるためと考えられる。また長周期条件で平均泡面積が増加する傾向にあるのは、岸側の遊水室でのピストンモードによって遊水室内の水面変動が増幅されて、カーテン壁天端部からの越流現象が卓越するためと考えられる。また図示は省略するが、水深条件がL.W.L. ($h=67\text{cm}$) の実験結果でも、同じような気泡連行効果が見られた。このことから、気泡連行促進型低反射工は、多重カーテンウォール型低反射工に比べて効率よく気泡を発生させることができる堤体形状といえる。さらに、水中に連行された気泡はカーテン壁内部を通過して壁下端部で発生する渦に引き込まれるため、水中滞在時間が長くなることが実験観察により確認されている。

(3) D0 回復効果

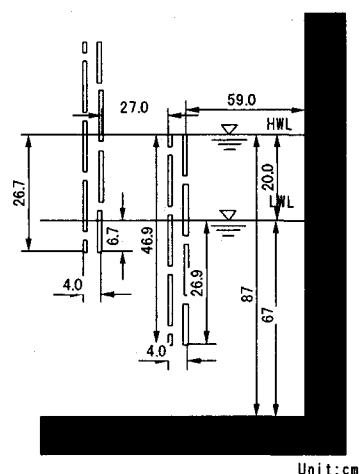


図-11 気泡連行促進型低反射工の断面形状

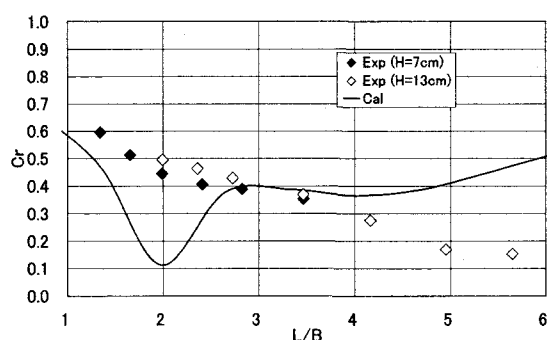


図-12 気泡連行促進型低反射工の反射率
(水深 $h=87\text{cm}$, B : 堤体幅=94cm, $f_c=0.2$)

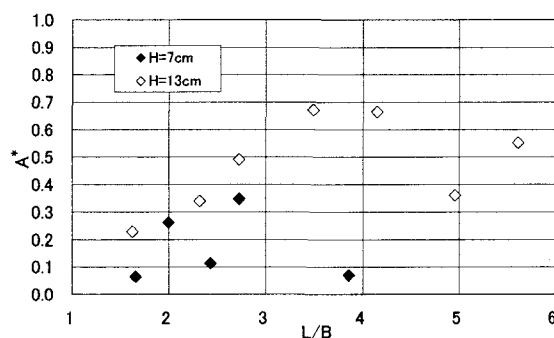


図-13 気泡連行促進型低反射工の平均泡面積
(水深 $h=87\text{cm}$, B : 堤体幅=94cm)

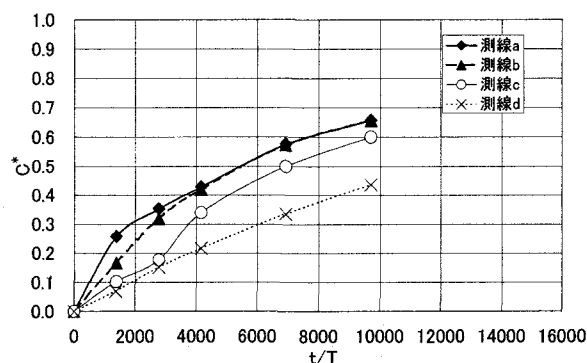


図-14 気泡連行促進型低反射工のD0回復効果
($h=87\text{cm}$, $H=13\text{cm}$, $T=1.3\text{s}$ ($L/B=2.8$))

図-14は気泡連行促進型低反射工のD0測定実験の結果の代表例として、水深 $h=87.0\text{cm}$ 、波高 $H=13\text{cm}$ 、周期 $T=1.3\text{s}$ ($L/B=2.8$)の実験結果である。この図から、作用波数 t/T が7000波のとき、図-8、10で示した多重カーテンウォール型低反射工の実験結果と比較すると、堤体から離れた測線d以外の結果は1.5倍から2倍ほどのD0回復量を示していることが分かる。

以上の検討から、気泡連行促進型低反射工は多重カーテンウォール型低反射工と同等程度の反射波低減効果を有し、さらに優れたD0回復促進効果を兼ね備えた堤体形状であるといえる。

5. 曝気水塊の沖側への輸送促進

D0測定実験では、図-14に示すように、測線dの実験結果が沖側の水域を想定しているため他の3測線よりも離れた位置にあり、D0回復速度が遅い傾向にある。そこで、堤体付近で曝気された水塊を沖方向へ輸送させて、広範囲の水塊のD0回復させる方法について検討を行った。

図-15で示す堤体形状は、沖側遊水室に水平版を設置することで、ピストンモード時に発生するカーテン壁下端部渦の流れ方向を冲向きに矯正させ、堤体付近で曝気された水塊を輸送させることを期待したものである。

図-16は、水平版を設置した気泡連行促進型低反射工のD0測定実験の実験結果の代表例である。この図から、測線dの結果が他の3測線と同じようなD0回復速度を示しており、図-14と比較しても、効率よく沖側へ曝気水塊を輸送していることが確認できる。このことから、水平版を設置すると沖側の水塊のD0回復に効果のあることが確認できた。

しかし、これらの実験は図-2に示すように、両端が閉鎖した2次元水槽を用いており、実海域でも同様の効果が得られるかどうか疑問視される。このため、今後は平面水槽などを用いた3次元的な実験を行うなどの、さらなる検討が必要と考えられる。

6. 結語

(1) 護岸など不透過壁前面に設ける多重カーテンウォール型低反射工は、低減する波周期が異なる二条件で現れるため、広範囲の周期帯で反射波の低減が可能である。

(2) 多重カーテンウォール型低反射工は、直立堤の場合と比較して、ピストンモード波浪共振によるカーテン壁下端部の渦流れの発生が見られるため、界面更新による曝気促進が期待できる。このとき水中に気泡を連行させると、曝気効果はより顕著に向上する。

(3) カーテン壁にスリット孔を設置すると、水面との衝突現象によって効率的に気泡が発生する。またカーテン壁下部の渦低圧部に引き込むことにより気泡が

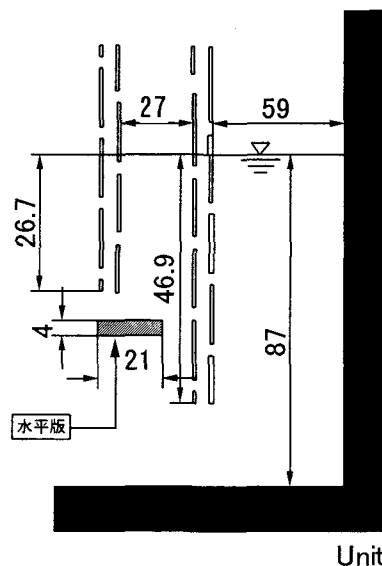


図-15 水平版を設置した気泡連行促進型低反射工の断面形状

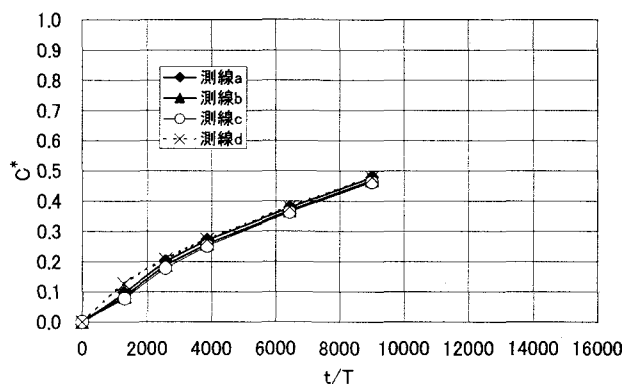


図-16 水平版を設置した気泡連行促進型低反射工のD0回復効果 ($h=87\text{cm}$, $H=13\text{cm}$, $T=1.4\text{s}$ ($L/B=3.3$))

長時間水中に滞在するので、溶存酸素濃度(D0)を高めるのに有効である。

(4) 沖側の遊水室下部に水平版を設置すると、カーテン壁下端部渦を利用した冲向き方向の流れが卓越して、D0値が回復された水塊の拡散に有効である。

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，pp797-800，1999。
- 2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における反射波の分離推定法，港湾技研資料，N0.248，pp199-245，1976。
- 3) 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。
- 4) 東京天文台編纂：理科年表，p447，2003。(丸善出版)