

潮位変動が鉛直循環流誘起堤体の 効果に及ぼす影響

EFFECT OF TIDE LEVEL ON EFFECTIVENESS OF
BREAKWATER PROMOTING VERTICAL CIRCULATION FLOW

遠藤 徹¹・重松孝昌²・藤田 孝³・小田一紀⁴

Toru ENDO, Takaaki SHIGEMASTU, Takashi FUJITA, and Kazuki ODA

¹ 学生会員 工修 大阪市立大学大学院工学研究科 後期博士課程 (558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

² 正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科 助教授 (558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³ 正会員 工修 日立造船株式会社 鉄構・海洋研究所 主任研究員 (558-8585 大阪市大正区船町 2-2-11)

⁴ 正会員 工博 大阪市立大学名誉教授

A new breakwater promoting vertical circulation flow and transporting oxygen-rich water to the sea bottom has been developed for improvement of the sea bottom environment. Effectiveness of the developed breakwater promoting vertical circulation flow has already been verified by the experiment with constant water depth. In this paper, effectiveness of the developed breakwater is investigated by large-scale experiments with different water depths. Consequently constructive improvement of the breakwater is examined through additional experiments. Furthermore, total volume of water mass transported into the sea bottom during one tide is estimated and presented as a quantitative index representing effectiveness of a promoting vertical circulation function of the proposed breakwater.

Key Words: breakwater, vertical mixing, vertical circulation flow, hypoxia, anoxia

1. はじめに

閉鎖性の強い内湾は、その地理的利点を利用して船着き場が築造しやすく、その背後には集落が発展した。物流や情報の拠点として発展した船着き場は、その規模を拡大して港となる。物流量の増加に伴って空間を有効利用するために、鉛直構造を有する防波堤や護岸が築造されるようになった。このような鉛直構造物は、静穏性を確保するには非常に有効であったが、一方で、海水交換機能や拡散・混合機能を喪失する結果となった。また、垂直構造物には、ムラサキガイ等に代表されるような新たな付着生態系が創出された。富栄養化した海域では、このような付着生物の成長は早く、死亡すると滑落して水底で腐敗し、特に夏季にはバクテリアの分解作用によって大量の酸素が消費されることになる。前述のような海水交換機能や拡散・混合機能の低下と相俟って、鉛直構造物前面の水底では深刻な貧酸素化が発生しているのが実情である。

著者らは、このような海域の底質環境を改善するためには、底層域への酸素供給を促進することが望ましいと考え、波のエネルギーを流れに変えて表層からの

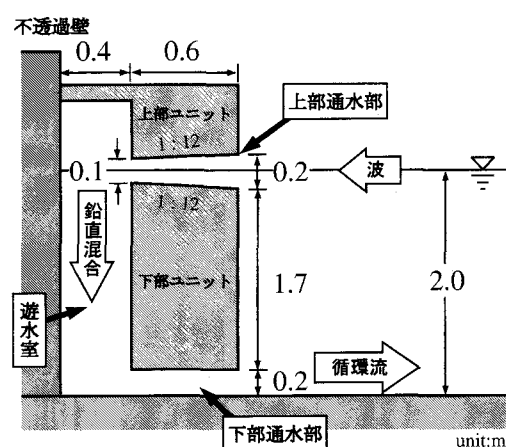


図-1 鉛直循環流誘起堤体の概念図

鉛直循環を促進させる鉛直循環流誘起堤体の開発を行っている。本堤体は、図-1に示すように、鉛直護岸の沖側に上部ユニットと下部ユニットからなる堤体前面壁を設置することにより、上部通水部・遊水室・下部通水部を有した構造になっている。上部通水部には1:12の勾配が設けられており、本堤体の消波機能および鉛直

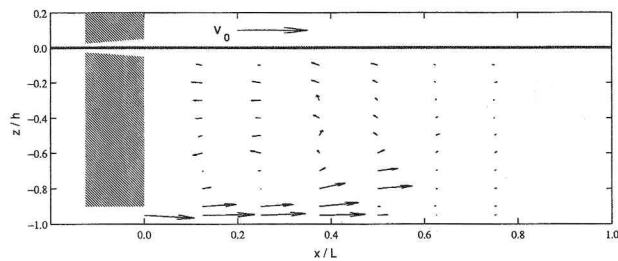


図-2 水深が $h=2.0\text{m}$ の模型実験による本堤体の鉛直循環流の実験結果, v_0 :代表水粒子速度 ($2\pi H/T$)

循環機能はこの上部通水部で発生する碎波に強く依存している。上部通水部で碎波が生じると、質量輸送によって遊水室内と堤体前面の平均水位に差が生じ、これにともなって下部通水部から堤体沖側への流れが発生する原理となっている。この鉛直循環流誘起機能が、酸素を豊富に含んだ表層水を貧酸素化した底層域へと輸送するため底層の貧酸素化および底質環境の改善にとって有効であると考えられる。

本堤体は、著者らによって Lin&Liu^{1),2)} が開発した高次乱流モデルと VOF 法を併用した数値波動解析モデルを用いて所期の目的が達成されるような構造諸元が模索され、水深が 1.0m の水理模型実験によってその有効性が検証された³⁾。さらに、水深が 0.15m の実験によって密度成層場での有効性についても検証されている⁴⁾。また、水深が 2.0m の大規模模型実験によっても本堤体の有効性が検証されている⁵⁾。大規模模型実験で得られた提案堤体近傍の流況の一例を図-2 に示す。同図より明らかなように、下部通水部から沖側底層へと有意な流れが発生していることがわかる。本堤体は水面近傍に通水部を有している構造であるため、水深が支配因子のひとつと考えられるが、本堤体の有効性の検討はこれまで、水深が一定の下で行われてきた。そこで本研究では、鉛直循環流誘起堤体の効果に及ぼす潮位の影響について検討した。

2. 実験概要

(1) 堤体模型

鉛直循環流誘起堤体の構造諸元を図-1 に示す。堤体前面壁の堤体幅は 0.6m で、堤体前面壁と背面不透過壁に挟まれた遊水室の幅は 0.4m である。上部通水部の沖側開口高さは 0.2m 、岸側高さは 0.1m で、その勾配は $1:12$ になっている。また、平均水位の静水面が上部通水部の中央に位置している。下部通水部の開口高さは 0.2m である。

(2) 実験方法

実験は、大阪市立大学工学部所有の長さ 100m 、幅 3.0m 、高さ 3.0m の大型二次元造波水槽を用いて行った(図-3 参照)。この水槽の一端には、ピストン型造波装置が設置されている。造波装置から約 65m 離れたとこ

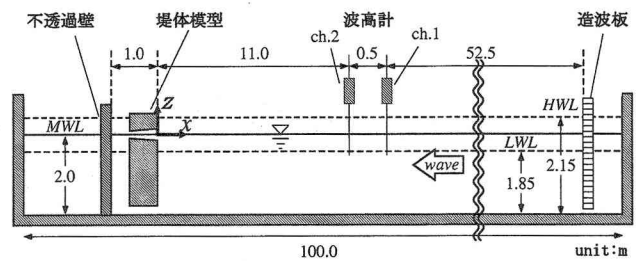


図-3 実験水槽および実験装置

ろに不透過壁を設置し、その沖側に鉛直循環流誘起堤体の模型を設置した。

実験は、水深を変化させて行い、反射率 K_r と下部通水部の水平流速 u を計測し、水深の変化にともなう反射特性および鉛直循環流誘起効果について検討した。反射率は、2台の容量式波高計 (KENEK) を堤体から 14.0m と 14.5m 沖側に離れた地点に設置し、これらの波高計で得られた波形データを用いて入反射分離推定法⁶⁾により求めた。下部通水部における流速は、1台の鉛直二軸電磁流速計 (アレック電子) を下部通水部の沖側端に設置して計測した。波高計および流速計のサンプリング周波数は、いずれも 50.0Hz とし、計測時間は造波開始時から造波板による再反射波が堤体に作用するまでとした。

(3) 実験条件

実験水深は大阪湾湾奥部の実測潮位データ⁷⁾に基づいて決定した。すなわち、図-4 に示すように、平均水位 (M.W.L.) である $h=2.0\text{m}$ の場合に水面が上部通水部のちょうど中間に位置するよう設定し、 $1.85 \leq h \leq 2.15\text{m}$ の範囲で 0.05m 毎に変化させた7通りとした。また、波浪条件は夏季の大阪湾湾奥部の実測データ⁸⁾を基に、静穏時の波浪を対象として、周期が $T=1.78\text{s}$ 、波形勾配が $H/L=0.01, 0.02$ の規則波とした。実験条件の詳細は、表-1 に示す。これらの条件は、水深 10m の実海域を想定したとすれば、潮位差 $\eta=1.5\text{m}$ の海域で、周期 $T=4.0\text{s}$ 、波高 $H=25.0, 50.0\text{cm}$ の波浪を対象としていることになる。

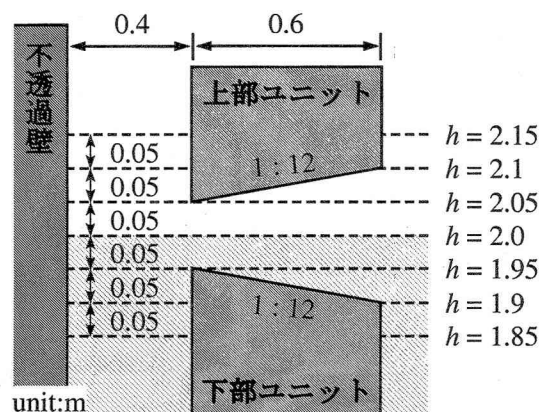


図-4 上部通水部と実験水深の位置関係

表-1 実験ケース

Case	周期 $T(\text{sec})$	水深 $h(\text{m})$	波長 $L(\text{m})$	波形勾配 H/L	波高 $H(\text{cm})$
1	1.78	2.15	4.91	0.01	4.9
2	1.78	2.10	4.90	0.01	4.9
3	1.78	2.05	4.90	0.01	4.9
4	1.78	2.00	4.89	0.01	4.9
5	1.78	1.95	4.88	0.01	4.9
6	1.78	1.90	4.87	0.01	4.9
7	1.78	1.85	4.86	0.01	4.9
8	1.78	2.15	4.91	0.02	9.8
9	1.78	2.10	4.90	0.02	9.8
10	1.78	2.05	4.90	0.02	9.8
11	1.78	2.00	4.89	0.02	9.8
12	1.78	1.95	4.88	0.02	9.8
13	1.78	1.90	4.87	0.02	9.8
14	1.78	1.85	4.86	0.02	9.8

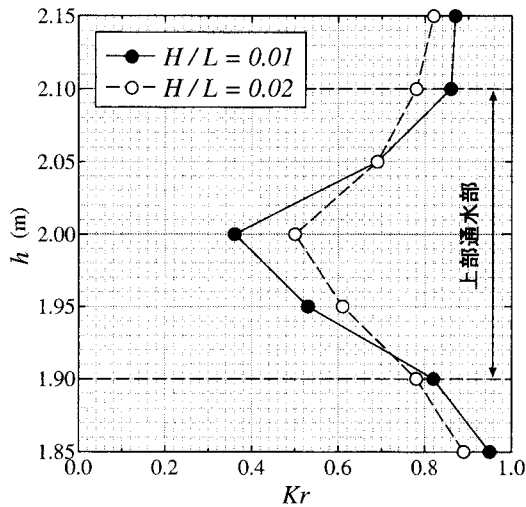


図-5 反射率 K_r と水深 h の関係 ($T = 1.78\text{s}$)

3. 実験結果と考察

(1) 反射率 K_r について

反射率の実験結果を図-5に示す。同図によると、反射率は $H/L = 0.01, 0.02$ とともに $h = 2.0\text{m}$ で極小値を示し、水深が $h = 2.0\text{m}$ より深くなっても浅くなってもその値は大きくなり、消波機能が低下することがわかる。特に、水深が $h = 1.85, 1.90, 2.10, 2.15\text{m}$ の場合は、反射率が 0.8 以上となり消波機能が著しく低下している。これらの場合は、水面が上部通水部に位置しない状態となり、上部通水部で碎波が発生しないため、波のエネルギーが減衰されないからである。以上の結果から、本堤体の反射特性は、水深に強い依存性があることが確認されたと言える。

(2) 下部通水部水平平均流速 $\bar{u}$ について

下部通水部における水平流速 u の時経列変化の一例を図-6に示す。図-6は、 $h = 2.0\text{m}$ 、 $T = 1.78\text{s}$ 、 $H/L = 0.02$

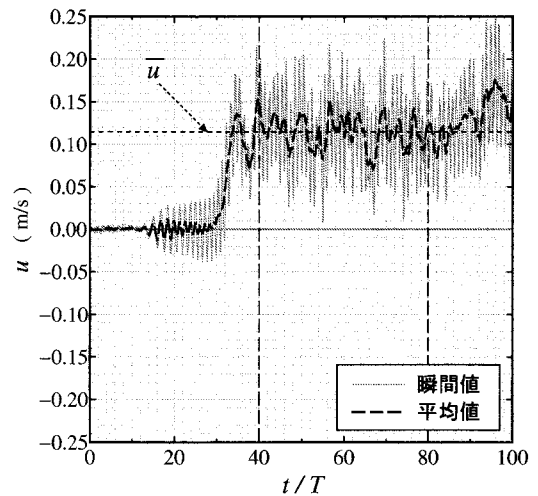


図-6 下部通水部における水平流速 u の時刻列変化 ($h = 2.0\text{m}$ 、 $T = 1.78\text{s}$ 、 $H/L = 0.02$)

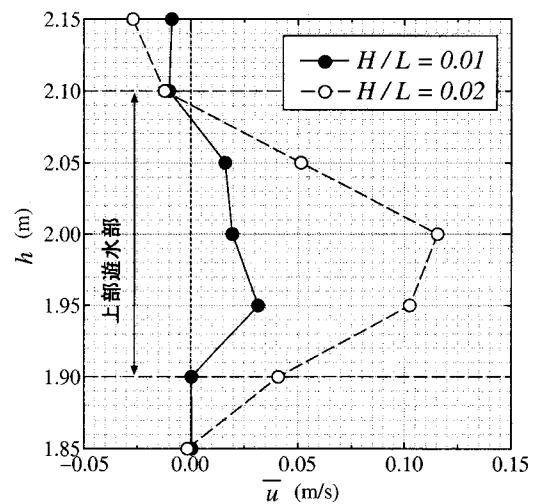


図-7 下部通水部平均水平流速 $\bar{u}$ と水深 h の関係 ($T = 1.78\text{s}$)

の場合の実験結果を示したものである。図中の水平流速は、底層冲向きを正として表している。また、実線は瞬間値を、破線は一周期移動平均値を示しており、時間軸は周期 T で無次元化している。同図によると造波開始後 $t/T = 40$ 頃から下部通水部から底層冲向きの定常流が発生し始め、 $t/T = 80$ 以降になると造波板からの再反射波による影響が確認できる。そこで、下部通水部から底層冲向きの定常流が発生し始めてから、造波板からの再反射波の影響が現れるまでの範囲で u の時間平均値を求め、これを下部通水部平均水平流速 $\bar{u}$ と称することにする。以下の議論は下部通水部流速 $\bar{u}$ を基に、行うこととする。

下部通水部水平平均流速 $\bar{u}$ と水深 h の関係を図-7に示す。同図によると、 $\bar{u}$ は $H/L = 0.01, 0.02$ とともに、水面が上部通水部に位置する場合 ($1.9 < h < 2.1\text{m}$) は沖側底層域への流れが発生していることが確認できる。しかし、水深が $h = 1.9\text{m}$ 以下の時は、 $\bar{u} = 0.0\text{m/s}$ であり下

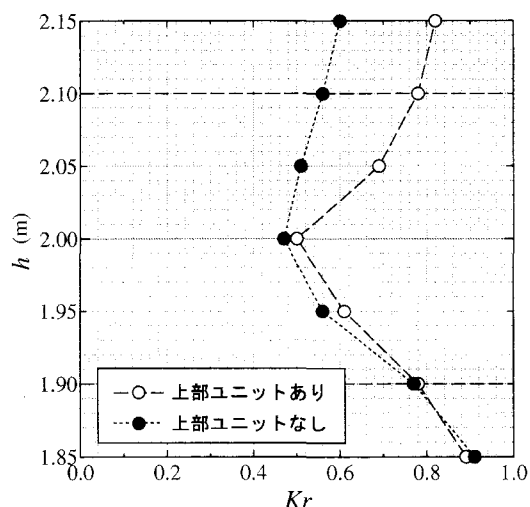


図-8 上部ユニットの有無による K_r の比較
($T=1.78s$, $H/L=0.02$)

部通水部からの流れが発生していない。これは、水面が上部通水部よりも低い場合は、上部通水部から遊水室内への表層水の進入がほとんどないため、遊水室内と堤体前面との間に水位差がつかないためである。一方、水深が $h=2.10m$ 以上の時は、 $\bar{u}$ の値が負の値を示している。これは堤体の沖側底層水が下部通水部を通じて遊水室内へ流入していることを意味している。つまり、上部ユニットに達するほど水深が深くなると、堤体前面の底層水が遊水室および上部通水部を介して表層へと輸送され、所期の循環流とは相反する循環流が発生することが明らかとなった。

4. 上部ユニットの有無による鉛直循環流誘起機能の比較

本堤体の開発当初は、上部通水部の上端と下端に勾配を設けることによって沖側表層水の遊水室への輸送が促進され、また、遊水室から沖側への戻り流れが抑制されることを期待して、本堤体に上部ユニットを設けていた。しかし、前述の実験結果から水面が上部ユニットよりも上に位置する場合は、上部通水部において碎波が生じず、期待するような循環流が発生しないことが明らかとなった。そこで、鉛直循環流誘起堤体の上部ユニットを取り除いて前述と同様の実験を行った。ただし、周期は $T=1.78s$, $H/L=0.02$ のみとした。

(1) 反射特性について

上部ユニットがある場合とない場合の反射率 K_r と水深 h の関係を比較したものを図-8 に示す。同図によると、水深が $h=2.0m$ 以下の場合は、上部ユニットの有無にかかわらずほぼ同じ反射率を示している。しかし、水深が $h=2.0m$ よりも大きい場合は、上部ユニットがない場合の方がある場合よりも反射率の値は小さくなっており、上部ユニットがないほうが消波効果が向上す

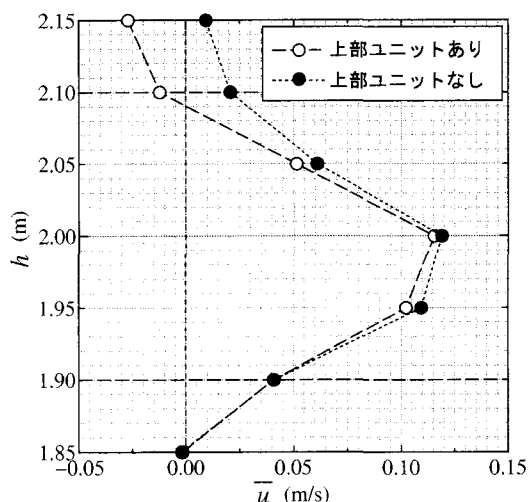


図-9 上部ユニットの有無による $\bar{u}$ の比較
($T=1.78s$, $H/L=0.02$)

ることが明らかとなった。これは、水面が上部通水部よりも下にある時は、上部ユニットがない場合でも堤体前面壁の沖側断面が直立構造物となるため、上部ユニットの有無にかかわらず同様の傾向を示したのである。一方、水面が $h=2.0m$ よりも上にある場合は、下部ユニットの上端斜面の影響によってエネルギーが消散されたために反射率が低下したものと考えられる。

(2) 鉛直循環流誘起効果について

下部通水部平均水平流速 $\bar{u}$ について、両者の比較を図-9 に示す。同図によると、 $\bar{u}$ に関しても K_r と同様、水深が $h=2.0m$ 以下の場合は、上部ユニットの有無にかかわらず両者の $\bar{u}$ はほぼ同様の値を示している。また、水深が $h=2.0m$ 以上の場合は、上部ユニットがない場合の $\bar{u}$ は常に正の値を示しており、堤体沖側の底層水が下部通水部を通じて遊水室へ流入しなくなっていることが確認できる。鉛直循環流誘起効果に関しても、上部ユニットがない場合の方がある場合と比べて底層環境の改善にとって効果的であるということが明らかとなった。

以上の実験結果から、水面が提案堤体の上部ユニットに達しなければ、あるいは上部ユニットがない場合には、高潮位時でも常に表層水を沖側底層域へ輸送することができるということが明らかとなった。

本堤体の実海域への適用を想定した場合には、係留施設や歩行空間として本堤体の上部空間の有効利用を図るために、本堤体には上部ユニットを設けておくことを考えている。そのため、本堤体を設置する際には、設置しようとする海域の潮位データに基づいて、有効な鉛直循環流誘起効果が期待できるような上部通水部の最適位置および開口高さを検討する必要があるといえる。

5. 表層水輸送機能の評価

ここでは、本堤体の鉛直循環流誘起機能を評価するために、一潮汐あたりに下部通水部から底層域へ輸送される流量 Q について試算した。

(1) 下部通水部からの流出流量 Q の試算方法

一潮汐の間に変動する水深 h を正弦関数として以下のように表す。

$$h = h_0 + \frac{\eta}{2} \sin(2\pi t/T_t) \quad (1)$$

ここで、 h は水深、 h_0 は平均水位、 η は潮位差、 t は時刻、 T_t は潮汐の周期である。図-7および図-9から、この h に対応する下部通水部平均水平流速 $\bar{u}$ を導き、その $\bar{u}$ を時間積分することによって下部通水部から流出する流量 Q を求めた。すなわち、一潮汐あたりに底層域へ輸送される流量 Q は、

$$Q = \int_0^{T_t} \bar{u}(h) \cdot A dt \quad (2)$$

となる。ここで、 Q は単位幅あたりの下部通水部からの流出流量、 $\bar{u}$ は下部通水部平均水平流速、 A は下部通水部の単位幅あたりの断面積である。

なお、 η は、大阪湾湾奥部の実測潮位データに基づいて小潮時および大潮時の潮位差を求め、フルードの相似則によって本実験スケールに換算し、これを用いて Q を試算した。

(2) 一潮汐間の下部通水部平均水平流速 $\bar{u}$ の時刻列変化

潮位変動にともなって変化する $\bar{u}$ の時刻列変化を図-10、図-11に示す。図-10は小潮時の潮位変動にともなう $\bar{u}$ の変化を示しており、図-11は大潮時の場合を示している。ここで、横軸の時間項は一潮汐の周期で無次元化してある。図中の点線は潮位変動量を示しており、流速 $\bar{u}$ は図-7および図-9の h と $\bar{u}$ の関係を線形補間して求めている。

図-10によると、小潮時には上部ユニットの有無にかかわらず、 $\bar{u}$ は満潮時に極小値を取り、低潮時 ($t/T = 0.5 \sim 1.0$) に約 0.1m/s の定常的な流れが下部通水部を通じて沖側底層域へと発生すると推測される。一方、図-11によると、大潮時では、 $\bar{u}$ は満潮時と干潮時に極小値を取り、時間の経過とともに大きく変動すると推測される。すなわち、提案堤体は、小潮時には底層域へ安定した流量の表層水を輸送することができると考えられる。

(3) 一潮汐あたりの下部通水部流量 Q

図-12に一潮汐あたりに下部通水部から流出する流量 Q の試算結果を示す。同図によると、上部ユニットがある場合でもない場合でも、潮位差 η が大きくなれば Q は、ほぼ線形的に単調減少する傾向が見られる。

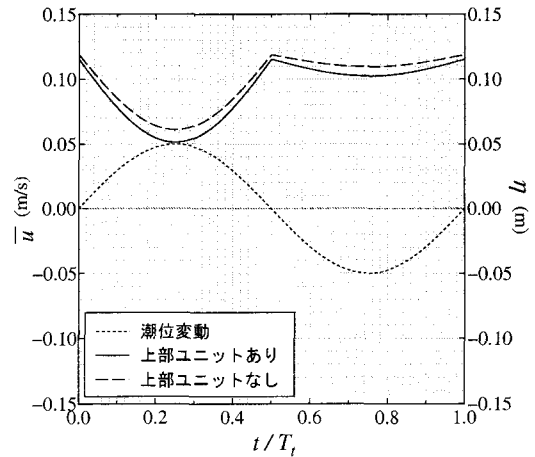


図-10 小潮時の $\bar{u}$ の時刻列変化 ($\eta = 0.1\text{m}$)

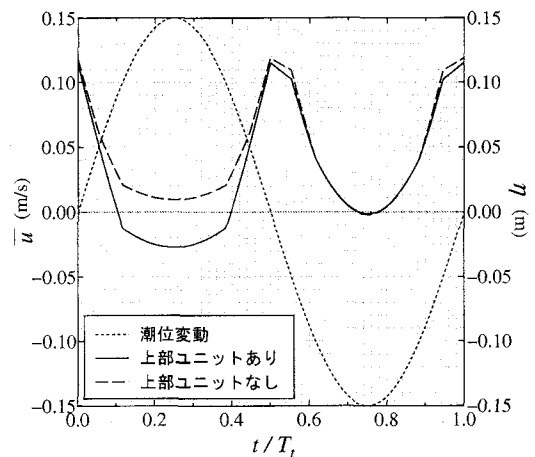


図-11 大潮時の $\bar{u}$ の時刻列変化 ($\eta = 0.3\text{m}$)

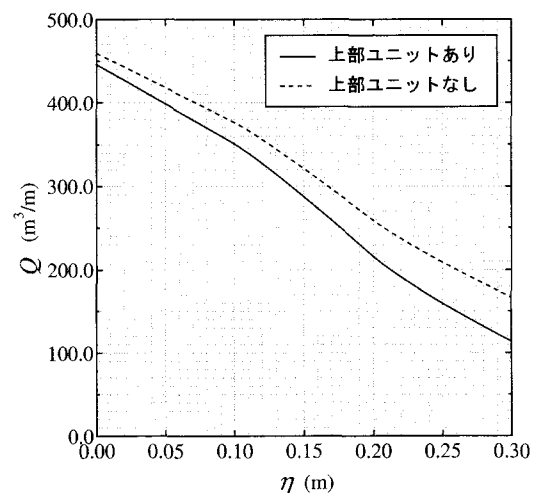


図-12 潮位差 η と流出流量 Q の関係

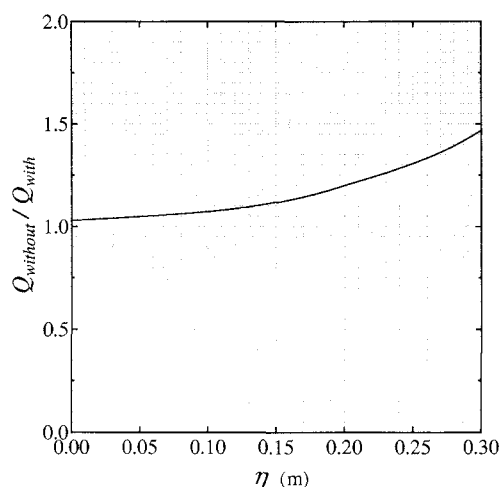


図-13 $Q_{without}$ と Q_{with} の比較 ($T=1.78s$, $H/L=0.02$)

上部ユニットがある場合の一潮汐あたりに底層域へ輸送される流量 Q は、大潮時 ($\eta=0.3m$) で約 $110.0m^3/m$ 、小潮時 ($\eta=0.1m$) で $450.0m^3/m$ 程度であり、上部ユニットがない場合では、大潮時 ($\eta=0.3m$) で約 $170.0m^3/m$ 、小潮時 ($\eta=0.1m$) で $460.0m^3/m$ 程度であった。よって、表層水輸送機能についても上部ユニットがない場合のほうが、ある場合よりも効果的であるということが明らかとなった。そこで、上部ユニットがない場合の表層水輸送量 $Q_{without}$ と上部ユニットがある場合の表層水輸送量 Q_{with} との比をとった。図-13に $Q_{without}/Q_{with}$ と潮位差 D の関係を示す。同図から、下部通水部から底層域へ輸送される流量は、上部ユニットがある場合よりもない場合の方が $1.0\sim1.5$ 倍程度向上していることがわかった。

6. 結論

1. 潮位変化にともなう本提案堤体の効果の検討を行った結果、本堤体の消波機能および鉛直循環流誘起機能は水深に強く依存し、その機能は上部通水部の中央に平均水位がある場合に最も高くなることが明らかになった。また、上部ユニットに達するほどに水深が深くなると、沖側底層水が下部通水部を通じて遊水室に流入することも明らかになった。

2. 上部ユニットを取り除いて実験をした結果、高潮位時において消波機能の低下を抑制することができると、また、下部通水部を通じて沖側底層水が遊水室に流入することはなくなり、底層水が表層に輸送されることは防止できることが明らかになった。したがって、上部ユニットがある場合よりもない場合のほうが幅広い潮位変動の下での鉛直循環流誘起効果が期待できることがわかった。
3. 一潮汐あたりに下部通水部から沖側底層域へ流出する流量 Q を試算した結果、 Q は潮位差 η と単調減少の関係があり、本堤体の鉛直循環流誘起効果は潮位差が大きい海域よりも小さい海域の方が大きいと予測された。このとき、上部ユニットがない方がある場合より効果的であるということが明らかとなった。

参考文献

- 1) Lin, P. and P. L-F. Liu (1998): A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone, J. Fluid Mech., Vol.359, pp.239-264.
- 2) Lin, P. and P. L-F. Liu (1998): Turbulence Transport, Vorticity Dynamics, and Solute Mixing Under Plunging Breaking Waves in Surf Zone, Journal of Geophysical Research, Vol.103, pp.15677-15694.
- 3) 重松孝昌・池田憲造・小田一紀・藤田孝 (2002): 底質環境の改善を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, 土木学会, pp.791-795.
- 4) 重松孝昌・池田憲造・小田一紀・小池敏也・延廣玲子・遠藤徹・藤田孝・戸川進 (2003): 密度成層場における鉛直循環流誘起堤体の効果に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp.1206-1210.
- 5) 遠藤徹・重松孝昌 (2004): 大規模模型実験による鉛直循環流誘起堤体の効果の検討, 第59回土木学会年次学術講演会, 土木学会, 2-217(CD).
- 6) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No.248.
- 7) 気象庁, 潮位表 大阪, <http://www.data.kishou.go.jp/marine/tide/suisan/suisan.php?stn=OS>, 2004/11/16.
- 8) 永井紀彦 (2002): 全国港湾海洋波浪観測 30 年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, pp.324-327.