

波動場における鉛直および水平没水平板周辺の流れ特性

村上仁士*・細井由彦**・澤村賀行***・池田良一***

1. 緒 言

海域の高度利用が叫ばれている現在、防波堤に課せられる要求もより高度なものになりつつある。すなわち、防波堤の設置によって周辺の水質悪化を招いたり、生態系を著しく変化させてはならず、しかも海域空間の景観を損なってはならないという厳しい条件を克服しなければならない。人工リーフはそうした考え方に立った代表的な例であるが、波を制御するには広い先端幅を要し、またマウンドにより底質を覆うために、既存の生態系に対する悪影響も懸念される。比較的浅い水域は魚類など多様な生物の生存環境にも適しており底質にできる限り手を加えないようにすることが望まれる。

本研究は、こうした視点から単純な鉛直板潜堤と水平没水平板を適当に配置、組合わせることにより波の制御と自然エネルギーを活用した水質、底質を保全できる構造物の開発の可能性を検討するものである。平板を鉛直および水平に組合わせた単純なモデルを考えていくとはいえ、構造物の設置により底面の砂の移動など底質に変化を与えるおそれもある。

人工リーフを含め潜堤の波浪制御効果に関しては、これまでも田中（1976）、宇多ら（1987）、谷野ら（1989）などにより多くの成果が得られている。また、近年水平没水平板についても理論的・実験的研究が服部ら（1975, 1977）、青山ら（1988）、余ら（1989）により行われ興味ある成果が報告されている。しかしながら、波動による鉛直潜堤や水平没水平板周辺の流れや乱れの特性については、まだ十分調べられていないのが現状である。

ここでは、まず研究の第一段階として鉛直板潜堤および水平没水平板個々の消波特性を検討したのち、波動による各防波堤周辺の流速や乱れの時空間分布の特性について、実験的検討を詳細に行う。それは今後これらの構造を配置、組合わせ波や流れと有効に制御しうる防波堤の開発を目指すための基礎資料を得ようとする意図によるものである。

2. 実験装置および実験方法

本研究では、最も簡単な構造の鉛直没水平板（以下、潜堤と呼ぶ）および水平没水平板（以下、水平板と呼ぶ）を厚さ 3 mm のアクリル製の平板で作成し、波消および流速特性を実験的に調べた。実験には、図-1 に示すように一端にフラップ型造波装置を有する長さ 15 m、幅 20 cm、深さ 30 cm の一次元造波水槽を用いた。水深 h は、全実験を通して 15 cm と一定にした。実験

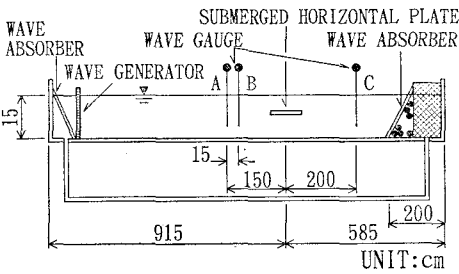


図-1 実験装置配置図（水平板実験）

表-1 潜堤の実験諸元

周期 $T(\text{sec})$	0.65				
波長 $L(\text{cm})$	60				
相対水深 h/L	0.25				
波形勾配 H/L	0.028	0.035	0.059	0.060	
相対没水深 d/h	0.0	0.066	0.2	0.33	0.66
天端上水深 $d(\text{cm})$	0	1	3	5	10

表-2 水平板の実験諸元

周期 $T(\text{sec})$	0.58		0.65		0.72		
波長 $L(\text{cm})$	50		60		70		
相対水深 h/L	0.3		0.25		0.21		
波形勾配 H/L	0.053		0.041		0.025		
	0.068		0.051		0.036		
	0.076		0.064		0.044		
			0.075		0.054		
相対没水深 d/h	0.1	0.17	0.23	0.3	0.37	0.43	0.5
没水深 $d(\text{cm})$	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
相対平板長 l/L	0.25	0.33	0.5		0.67	1.0	
平板長 l	$L/4$	$L/3$	$L/2$		$2L/3$	L	

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科
** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科
*** 学生員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

諸元は潜堤の場合には、表-1 で示すように周期 T を 0.65 sec と固定し、天端上水深 d 、波形勾配 H/L を変えた。また、水平板では、表-2 のように周期 T を 0.58 sec, 0.65 sec および 0.72 sec とし、各周期について、没水深 d 、平板長 l および波形勾配 H/L などの諸元を変えた。入射波と反射波は、合田ら (1976) の方法で分離し、反射率、透過率およびエネルギー逸散率を求めた。

流速特性を調べるために、波の周期 T が 0.65 sec, 波形勾配 $H/L=0.059$ の場合について潜堤および水平板周辺における流速をレーザー Doppler 流速計 (SYSTEM 9100-3, KANOMAX 社製, 以下, LDV と呼ぶ) を用いて計測した。潜堤については 1 ケース 80 測点, 水平板については 1 ケース 92 測点にわたって水平および垂直方向の流速と測点上での波高の時間変動のデータを造波直後から造波板からの再反射波が堤体に届くまでの 40 秒間収録した。ここで流速データについては LDV より得られる Doppler 周波数を信号処理器 (SYSTEM 8015, KANOMAX 社製) によって電圧に変換して出力し、波高データと同時にサンプリング周波数 102.4 Hz でパソコンに AD 変換させたもの 4096 個のデータとして統計処理した。それによって流速および波高の安定した範囲をゼロアップクロス法により各堤体における一周期間の解析範囲としてまとめた。各防波堤周辺測点での時間平均流速 $\bar{V}(\bar{U}, \bar{W})$ と乱れ強度 $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{w}^2}$ の空間分布が一周期間でどのように変化するかについて調べた。

3. 潜堤および水平板の消波特性

まず、潜堤による消波特性の結果を示す。

図-2 は、潜堤における透過率 k_T と相対没水深 d/h の関係を示したものである。 H/L の影響は顕著でなく、 d/h の増大にともなって k_T の値は大きくなる。 d/h が 0.2 程度であっても k_T の値は 0.6~0.7, d/h が 0.7 程度になると k_T の値は 0.9 以上にもなり、天端幅が狭い潜堤では透過波の制御効果は d/h を極端に小さくしない限り悪いことがわかる。一方、反射率 k_R について図-3 に示したが、透過率とは逆に d/h が大きくなるにともない k_R の値は小さくなるのがわかる。

図-4 は、エネルギー逸散率 $\varepsilon (=1-k_R^2-k_T^2)$ を示している。 $d/h=0\sim0.2$ のとき入射波の 40~50% のエネルギーが堤で逸散されるが、 d/h が大きくなると、急激に消波効果は期待できなくなることがわかる。

次に、水平板による消波特性の結果を示す。

本実験では、まず相対平板長 l/L を 0.25~1.0 の間で 5 種類変え、エネルギー逸散率 ε を調べた結果、相対没水深 d/h が等しい場合には l/L が大きいほど消波効果はよかった。しかし、 $l/L=0.5$ の場合と $l/L=1.0$

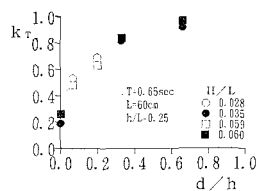


図-2 潜堤の透過率

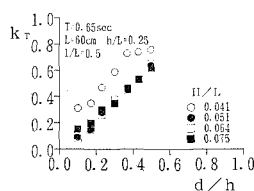


図-5 水平板の透過率

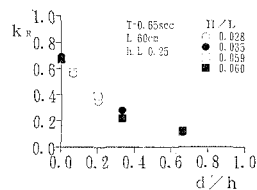


図-3 潜堤の反射率

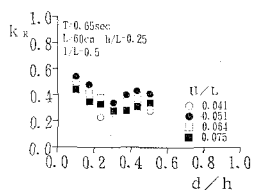


図-6 水平板の反射率

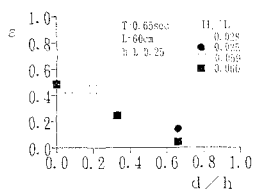


図-4 潜堤のエネルギー逸散率

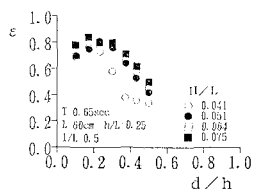


図-7 水平板のエネルギー逸散率

の場合でその値に大きな変化がないことを確認している。一方、青山ら (1988) は、 $0.3 \leq l/L \leq 0.5$ が消波効果が良いと指摘しているが、本実験では必ずしもその傾向はなかった。以下、 $l/L=0.5$ の場合について示す。

図-5 は、透過率 k_T の特性を示したものである。 d/h の増大につれ k_T の値は大きくなる。図-2 の潜堤と比較すると水平板の場合、 d/h が 0.2 のとき H/L によりばらつきがあるものの k_T の値は 0.1~0.3 程度であり、 d/h を小さくすれば、潜堤の場合に比べ透過波の制御効果が極めて大きいことがわかる。

図-6 の反射率 k_R をみると、 d/h が 0.3 程度で極小値をもつようである。 d/h が 0.3 よりも大きくなると潜堤に比べ反射波は大きくなることがわかる。本実験で得られた透過率および反射率に関する傾向は、服部ら (1977) の結果とも一致している。

図-7 は、エネルギー逸散率 ε の特性であり、 d/h が 0.1~0.3 で ε は極値をとり、その値は 0.7~0.8 にもなることがわかる。潜堤と比較すると ε の値は $d/h=0.2$ の場合でも 30~40% 大きい。服部ら (1975) が指摘しているように実用上は、 $d/h < 0.2$ としてよいことを裏付けている。

以上の考察から潜堤と水平板の各特性を組み合わせ、より効果的な波浪制御を期待しうる。

4. 潜堤および水平板の流速特性

水平および鉛直方向の水粒子速度 $V(U, W)$ の記録をもとに、一周期分の時間平均流速 $\bar{V}(\bar{U}, \bar{W})$ を求めるとともに、乱れ変動速度 $v(U - \bar{U}, W - \bar{W})$ を求めた。解析にあたり、読み込んだ20波分のデータを各位相ごとに平均して一波分のデータとし、その一周期のデータを50分割し、各位相の代表値（流速および波高）とした、そして任意の測点における水平および鉛直成分を合成して流速および乱れ強度を求めた。以下の図では、微小振幅波の入射波の静水面における最大流速 $U_{\max}$ で無次元化して表現している。また流速および乱れ強度分布の図はいずれも、水平方向の縮尺は鉛直方向のその1/2で表示している。ただし、流速ベクトル自体は水平および鉛直方向ともに同一縮尺で示した。一方、図中の右上の番号は、解析に用いた波の一周期を50分割したときの何番目の位相であるかを示している。

4.1 潜 堤

a) 流速の時空間分布

図-8 および 図-9 は、潜堤の天端上水深が小さい相対没水深 $d/h=0.066$ ($d=1\text{cm}$) の場合の50の位相に分割した流速の空間分布の一例である。図中の・点は計測点の水面を示しており、それを結べばその位相の波形を表すことになる。ここでの左上の $U_{\max}$ は 22.13 cm/sec である。

さて、すべての位相ごとの図をみた結果より流況を概観する。波が堤に近づくにつれて、沖側では堤に沿って下向きの流れが発生し沖側 $L/2$ (30 cm) の間に循環流が生ずる。さらに位相が進めば堤沿いの下向きの流れは弱まり、ついで 図-8 に示すように堤を越波し、波の峯が崩れ始めると沖側の堤沿いの流れは上向きになり岸側へ引き込まれるように水塊が移動する。このとき、堤の岸側では水面付近はかなり乱れるが、全体として岸側では時計まわりの弱い循環流が発生する。さらに位相が $t/T=0.28$ 進んだ 図-9 では、堤上の水位が堤頂近くになった状態となり、このとき堤の沖側では反時計まわりの循環流ができる。一方、堤を越波した水塊は堤内に投げ込まれた状態となり次の波が堤を越えるまでの間、堤の岸側に弱い時計まわりの循環流ができる。このとき各点の流速ベクトルはかなり多方向に向き、堤の岸側全域で弱い乱れが発生する。

図-10 は、天端上水深がやや大きい $d/h=0.2$ ($d=3\text{cm}$) の場合の流速の空間分布の一例を示したものである。図-8 と同位相であるが、それに比べ堤の沖側での流速成分が大きくなる。堤の岸側でも水面付近の流速は大きくなるが、堤頂部での波の変形は小さく、この場合でも水底に大きな流速は現れていない。

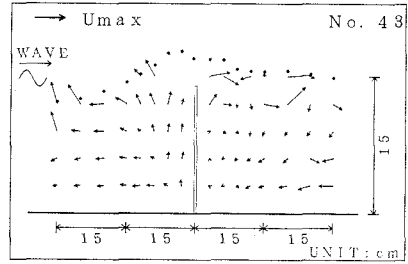


図-8 潜堤の流速分布 ($d/h=0.066$)

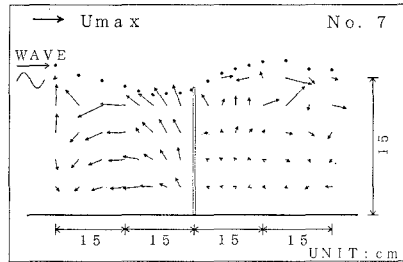


図-9 潜堤の流速分布 ($d/h=0.066$)

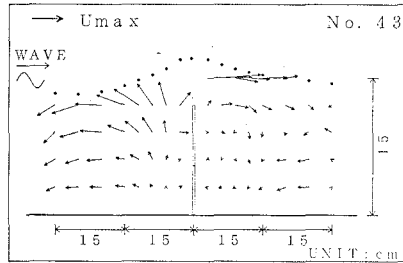


図-10 潜堤の流速分布 ($d/h=0.2$)

b) 乱れ強度の時空間分布

堤近傍で発生する渦の様相をみると、外海水が堤の岸側に引き込まれるときに、堤の天端で発生した渦が岸側に流入し、水面近くを渦が数波長にわたり移動、消散し、堤内に広がっていく。波が堤に近づくにつれて、堤の沖側では堤に沿う水面近くの乱れが大きくなり、堤を越波し始めると 図-11 (図-8 と同位相) のように乱れ強度は堤の沖・岸側の水面に近いほど大きくなる。さらに位相が進み、図-9 と同位相のとき堤の沖側水面付近で 図-11 よりもやや広い範囲にわたり強い乱れの領域

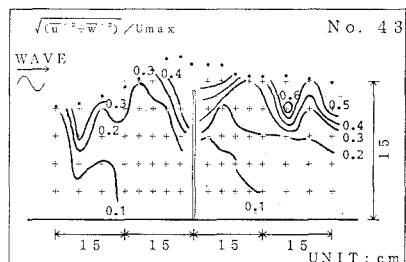
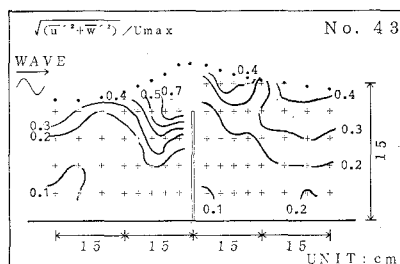


図-11 潜堤の乱れ強度分布 ($d/h=0.066$)

図-12 潜堤の乱れ強度分布 ($d/h=0.2$)

が広がる。一方、堤の岸側では水面付近の乱れの分布は変わらないが、その強度は小さくなるようである。

次に、 $d/h=0.2$ と天端上水深が大きい図-12の場合(図-10と同位相)には、堤の沖側水面付近の乱れ強度が $d/h=0.066$ の場合よりも大きくなるのがわかる。しかしながら、渦や乱れによって逸散される一周期間のエネルギーについては、図-4のとおり両者には大差はない。

4.2 水平板

a) 流速の時空間分布

図-13および図-14は、相対平板長 $l/L=0.5$ ($l=L/2$)、相対没水深 $d/h=0.17$ ($d=2.5$ cm)の水平板における流速の空間分布の一例である。ここでの左上の U_{max} は16.47 cm/secである。

さて、ここでもすべての位相ごとの図をみた結果より流況を概観する。

波が平板に到達し、平板上で碎波した状態が図-13に示されている。平板に波が到達すると岸側端で気泡が水中に取り込まれる。平板上では碎波にともなう大きな岸向きの流速が発生している。これによって堤の岸側の水面付近では、岸側に押し出されるような流れが発生し、水面付近の乱れも大きくなり、波のエネルギーが逸散される。この流れを補償するように平板の岸側下層部では、沖向きの流れが発生する。この状態では平板下で弱い循環流が生じているが、その流速は大きくない。平板の沖側端では吸い出されるように上向きの流れが生じている。さらに位相が $t/T=0.35$ と進んだ図-14では、平板沖側端の水位が最も小さい状態になる。平板岸側端の水面付近では、平板上の波が崩れて上層の水塊を巻き込むように岸側に大きな流速となって流れ込んでいる。このとき平板岸側端の下流下方で循環流が発生する。この位相では、平板の下で沖向きの流速も増大する。しかし、平板沖側端では平板下の沖向き流れと平板へ入射しようとする波の水粒子の速度により下向きの流れが生じる。

図-15には、没水深が大きい $d/h=0.43$ ($d=6.5$ cm)の場合の流速の空間分布(図-14と同位相)を示している。この場合には、平板上で波が碎波せず、進行

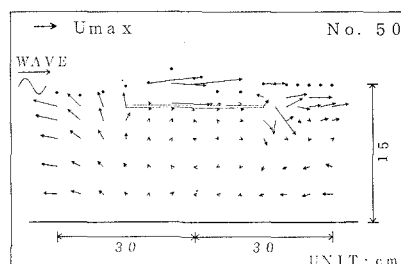
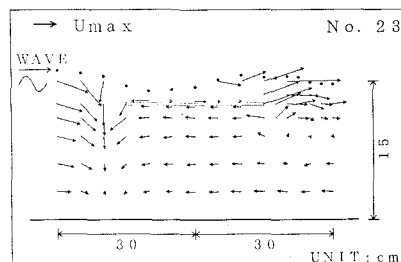
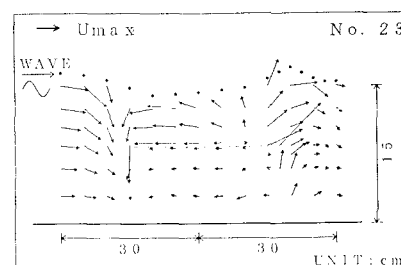
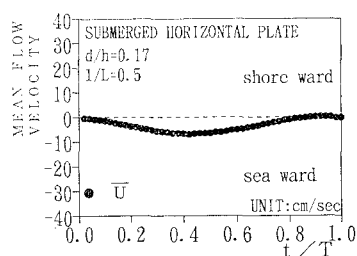
図-13 水平板の流速分布 ($d/h=0.17$, $l/L=0.5$)図-14 水平板の流速分布 ($d/h=0.17$, $l/L=0.5$)図-15 水平板の流速分布 ($d/h=0.43$, $l/L=0.5$)

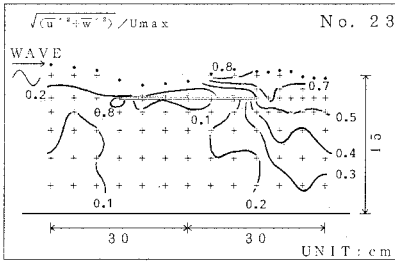
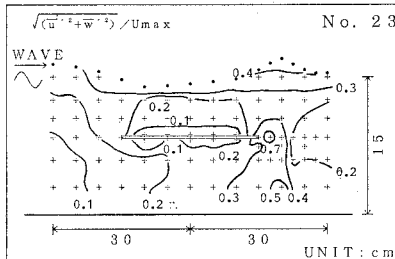
図-16 平板下における平均水平流速の位相変化

波と平板の岸側からの戻り流れが水平板上で衝突しているように見える。平板岸側で端上部の流速は $d/h=0.17$ の場合よりも小さい。

図-16は、 $d/h=0.17$ の場合の平板中央底面から6 cmの位置における平均水平流速 $\bar{U}$ の位相ごとの値を示したものである。平板を越波した水塊は平板の下部を通して常に沖側に向かって流れていることがわかる。

b) 乱れ強度の時空間分布

図-17は、図-14と同位相での乱れ強度の空間分布

図-17 水平板の乱れ強度分布 ($d/h=0.17$, $l/L=0.5$)図-18 水平板の乱れ強度分布 ($d/h=0.43$, $l/L=0.5$)

を示したもので、入射してきた波が平板上で碎波して水塊が岸側へ流れることによって、平板岸側端で大きな乱れを生じている。特に岸側端水面付近の乱れ強度は大きく、等乱れ強度線は平板下端を原点として放射状になり、平板の下方になるにつれて小さくなることがわかる。この乱れにより波のエネルギーが逸散される。平板下の乱れは $d/h=0.17$ の場合大きくない。

図-18 は 図-15 と同位相での $d/h=0.43$ の場合の乱れ強度であり、 $d/h=0.17$ の場合と比較して平板上で碎波しないために平板岸側端近傍の乱れ強度もそれより小さくなることがわかる。このことが、図-7 に示した波のエネルギー逸散率の違いに現れたものと考えてよいであろう。

ただ、 d/h が大きくなると平板下方の乱れの領域は広がり、平板と底面との間隔が短くなるだけ底面に及ぼす乱れの範囲が大きくなる。

また、ここには示さなかったが相対平板長 l/L を 0.25 とした場合、 $d/h=0.17$ の場合でも平板岸側端を

原点として放射状に大きな乱れ強度が生ずるが、 $l/L=0.5$ の場合に比べ平板岸側端の下方まで乱れが生じないことを確認している。

5. 結 言

波動場に置かれた鉛直および水平没水平板の消波および流速特性を実験的に詳細に調べた。

その結果、両防波堤の反射率・透過率およびエネルギー逸散率に及ぼす没水深の影響について把握した。ついで、堤上で碎波あるいは非碎波となる没水深を両堤周辺の流速測定結果をもとに、場所的・時間的流速分布および乱れの分布を求め、種々の条件に対する波の逸散機構を説明した。

こうしたことから、鉛直および水平没水平板を適切に配置、組合わせ、波や流れを有効に制御しうる構造物の開発に対する基礎的知見を得た。

最後に本研究にあたり、LDV 流速計の計測、波動解析にご協力いただいた徳島大学工学部中野晋講師に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 青山哲也・泉宮尊司・磯部雅彦・渡辺 晃 (1988): 没水水平板による波浪制御法に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 35 巻, pp. 597-511.
- 宇多高明・小俣 篤 (1987): 人工リーフの設計法, 土木技術資料, Vol. 29, No. 12, pp. 26-31.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研報告, No. 248, pp. 1-24.
- 田中則男 (1979): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果, 海岸工学論文集, 第 23 巻, pp. 152-157.
- 谷野賢二・水野雄三・渡邊康玄・平沢充成 (1989): 人工リーフによる波の変形について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 623-632.
- 服部昌太郎 (1975): 水平式透過性防波堤の波高伝達, 海岸工学論文集, 第 22 巻, pp. 513-517.
- 服部昌太郎・松本文信 (1977): 水平板型透過性防波堤の水利特性, 海岸工学論文集, 第 24 巻, pp. 266-270.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 特性曲線法を用いた没水水平板周辺の波浪場の非線形解析, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 524-528.