

波動場における傾斜没水平板周辺の流れ特性

村上 仁士*・伊藤 禎彦**・細井 由彦***・澤村 賀行****

1. 緒 言

近年の防波堤には、波の制御効果ばかりか設置水域の水質、底質を悪化させず、しかも周辺の景観をも損なわないよう、場所に応じた種々の構造が考案されている。人工リーフなどもその好例であるが、波高を抑制するには天端幅を広く取らねばならず、捨石等のマウンドにより底質を覆うために、既存の生態系のバランスを変化させる懸念がある。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、広域にわたり底質にできる限り手を加えない配慮が望まれる。著者ら（1992）は、こうした視点に立ち没水した単純な鉛直板や水平板について消波特性と合わせ、板周辺の流れに注目した研究を行ってきた。本研究は、その研究の一環をなすもので、水平板の岸側端が極端に水面に出ない範囲で上または下に傾斜させた傾斜没水平板（以下、傾斜板と呼ぶ）を対象としている。

傾斜板の反射、透過特性については、有効な平板長や傾斜角度に関する理論的考察もすでに行われている（青山ら，1988；高橋ら，1989；余ら，1989，1991；山下ら，1990）。しかし、傾斜板では碎波や渦の発生などの非線形現象をともしうため、理論解析でも渦の定量的な評価など、まだ多くの問題が残されている。また板上下の流れや渦の挙動は板周辺の生物環境にも影響を与えるはずであるが流況や渦による乱れについても明らかではない。

本研究では、傾斜板周辺で生ずる碎波や波の変形、消波、渦を含む流況等について観察、計測し、それをもとに板周辺の流速や乱れの時空間分布を詳細に調べた。

2. 実験装置および実験方法

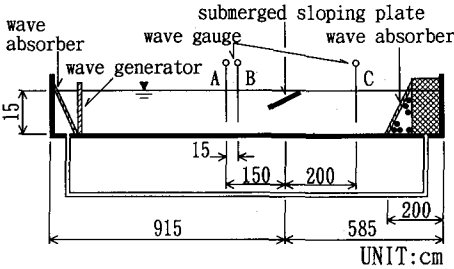
図一1に示すように一端にフラップ型造波機を備えた長さ15 m、幅20 cm、深さ30 cmの1次元造波水槽に幅20 cm、厚さ3 mmの亚克力製平板で作られた傾斜板を水槽壁面で固定して実験を行った。

本実験に用いた実験諸元を表一1に示す。実験の水深

h は15 cmであり、周期 T は0.65 sに固定している。なお、傾斜板の没水深 d は板沖側端での水面からの深さと定義している。実験に用いるべき d/h や l/L の範囲は、既往の研究成果を参照して決定した。板の傾斜角度 θ の範囲は、板の岸側端が水面に極端に出たり、逆に岸側端が水底に接することがないように配慮して $-10^{\circ} \leq \theta \leq +40^{\circ}$ とした。ここに、マイナス符号は平板の岸側端を上げた場合（以後、「Aタイプ」と略称）、プラス符号はそれを下げた場合（以後、「Bタイプ」と略称）を指す。Bタイプを考慮したのは、通常のAタイプの傾斜板へ波が入射した後、末端の海岸堤防や護岸からの反射波の挙動をみることにあたること、さらにこうした単純な傾斜板の組合せを考える場合の構造物の一つとしてBタイプの特性をみておこうとしたためである。

入射波および反射波の分離は前報（村上ら，1992）と同じで、反射率 k_R 、透過率 k_T およびエネルギー逸散率 $\varepsilon(=1-k_R^2-k_T^2)$ を求めた。

流速測定は、 $H/L=0.062$ 、 $d/h=0.2$ の場合に限ること



図一1 実験装置

表一1 実験諸元

周期	T (s)	0.65		
水深	h (cm)	15		
相対水深	h/L	0.25		
波形勾配	H/L	0.029	0.062	0.075
没水深	d (cm)	1.5	3.0	4.5
相対没水深	d/h	0.1	0.2	0.3
平板長	l (cm)	15	20	30
相対平板長	l/L	0.25	0.33	0.50
傾斜角度	θ (°)	-10, -5, 0, 10, 20, 30, 40		

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科
** 正会員 工博 徳島大学講師 工学部建設工学科
*** 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
**** 正会員 工修 鹿島建設(株)四国支店

とし、 $l/L=0.33$ については $-10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ 、 $l/L=0.5$ については $\theta=10^\circ$ に対して行われた。測定にはレーザードップラー流速計 (SYSTEM 9100-3, KANOMAX 社製) を用い、1 ケース 93~94 測点にわたり、水平および鉛直方向の流速を計測した。測点上の水位変動も流速と同時に計測している。

3. 消波特性

図-2 は、 $d/h=0.2$ の場合について、3 種類の板長 l/L に対し、透過率 k_T に及ぼす傾斜角度 θ の影響を調べたものである。 θ が負の領域にある A タイプの場合、 θ は小さな範囲に限られているが、 l/L が大きいほど θ が大きくなるにつれて k_T の減少傾向は大きく、 k_T の値は小さくなる。一方、 θ が正の領域にある B タイプの k_T の値は、 θ が 20° 程度までは $\theta=0^\circ$ の水平板に比べ l/L が大きいほど顕著に増大するが、 θ がそれ以上になると l/L や θ によって k_T の値に大きな変化はない。

図-3 は反射率 k_R について示したもので、A、B 両タイプとも k_R に及ぼす板長 l/L の影響は顕著でない。 $\theta=0^\circ$ の水平板と比べ A タイプでは θ を大きくすると板上での砕波により k_R の値を小さくしうるし、B タイプでも θ をある程度大きくすれば k_R の値を水平板よりも小さくしうることがわかる。

図-4 は、波のエネルギー逸散率 ε について示したものである。A タイプでは、 l/L が大きいほど、また θ が大きくなるほど ε の値も大きくなるが、B タイプでは l/L の影響は大きくない。

図-5 は ε に及ぼす板の没水深 d/h の効果を $l/L=0.33$ の場合についてみたもので、 $d/h=0.3$ の場合、 ε の値は最も小さくなるが、 $d/h=0.1$ と 0.2 での差は大きくない。いま、 $d/h=0.2$ の場合についてみると、 $\theta=0^\circ$ の水

平板では入射波のエネルギーの約 7 割が、A タイプの $\theta=-10^\circ$ では約 8 割が板により逸散されている。B タイプの場合の ε の値は水平板よりも小さくなり、 $\theta=20^\circ$ でも ε の値は 4 割程度となって θ を大きくしても ε の値を大きくすることができないことがわかる。

4. 流速特性

流速データの処理にあたり、前報 (村上ら, 1992) と同様、読み込んだ 30 波分のデータを同位相ごとに平均して 1 波分のデータとし、その 1 周期のデータを 50 分割し、各位相の水位変動および流速の代表値とした。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ベクトルおよび乱れ強度 $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{w}^2}$ を求めた。

図-6 は、A タイプの傾斜板近傍における 1 波長間の空間波形の時間変化を 1 周期間にわたり図化したものの一例である。A、B 両タイプについて、こうした波形を示す $t/T=0 \sim 1$ の間の各位相における流速および乱れ強度の空間分布を図示することにより流況や乱れの状態を調べた。

以下の図では、流速および乱れ強度は、入射波の静水面における最大水平流速 $U_{\max}=19.6 \text{ cm/s}$ で無次元化して表示し、図の水平方向の縮尺は鉛直方向の縮尺の 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。

4.1 各位相における流速および乱れの空間分布

図-7 および図-8 は、 $l/L=0.33$ 、 $d/h=0.2$ 、 $\theta=-5^\circ$ の諸元をもつ A タイプにおける流速 (上図) および乱れ強度 (下図) の空間分布で、ここでは 1 周期を 50 位相に分割し図示したもののうちの 2 つの位相での例を示している。

$t/T=0$ (図-7) では、板の沖側端付近から中央部にか

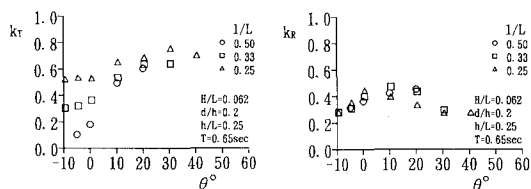


図-2 透過率 ($d/h=0.2$)

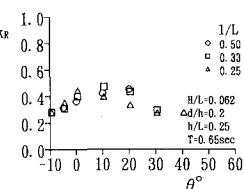


図-3 反射率 ($d/h=0.2$)

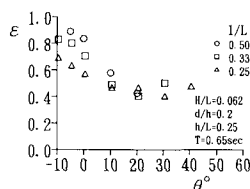


図-4 エネルギー逸散率 ($d/h=0.2$)

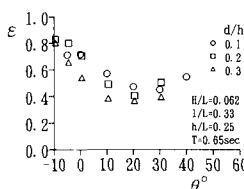


図-5 エネルギー逸散率 ($l/L=0.33$)

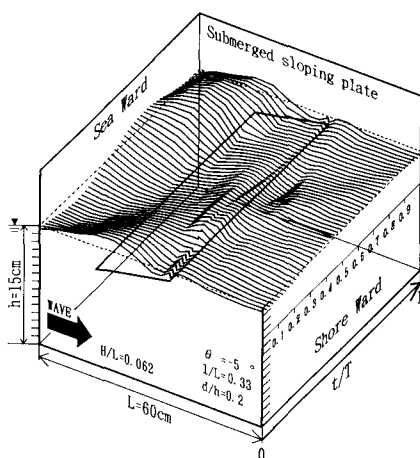
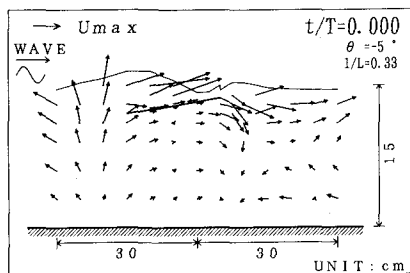


図-6 波形の変化 ($\theta=-5^\circ$)

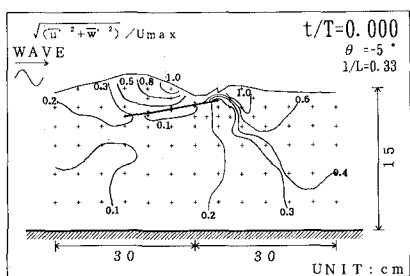
けて激しく碎波が生じ、板上方の波頭部では流速は最大となり、気泡を巻き込んだ強い乱れをもった水塊が波頭部で発生している。板の岸側端では水深が浅く噴流状の流れとなり、板上下の流速差から板端より水塊を巻き込むような流れがみられる。このとき、板の岸側端で強い乱れが発生する。その後、板上で碎波し乱れた水塊は板

上を遡上し、板の沖側端でも上向き流れのため渦が生じ、板の両端で乱れ強度が大きくなる。

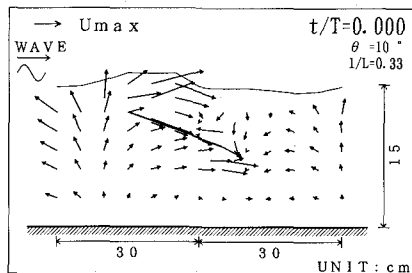
約1/2周期進んだ $t/T=0.52$ (図-8) では、次の波が板前面に近づき板沖側端で水位が最も下がった状態になる。このとき板上の弱い沖向き戻り流れと入射波の到来による岸向き流れにより板沖側端上では強い乱れが発生



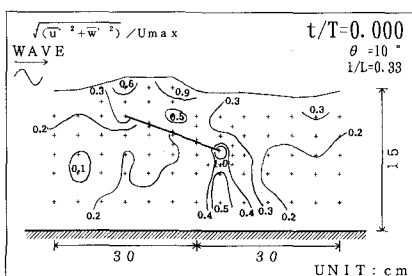
(1) 流速分布



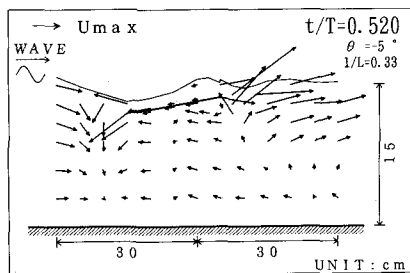
(2) 乱れ強度分布

図-7 Aタイプ ($\theta=-5^\circ$, $d/h=0.2$)

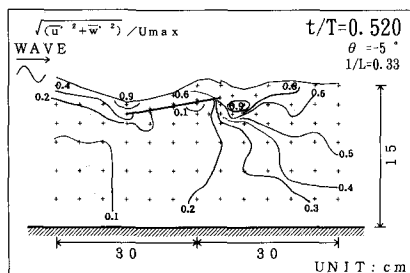
(1) 流速分布



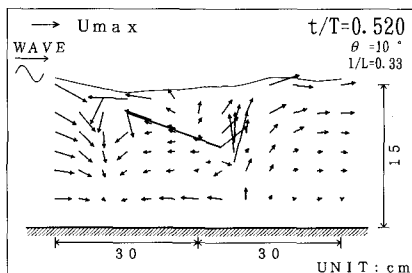
(2) 乱れ強度分布

図-9 Bタイプ ($\theta=10^\circ$, $d/h=0.2$)

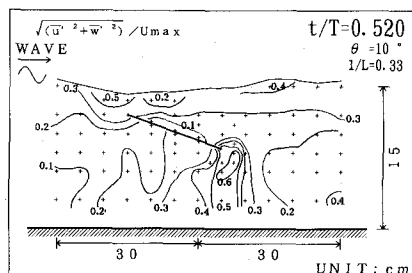
(1) 流速分布



(2) 乱れ強度分布

図-8 Aタイプ ($\theta=-5^\circ$, $d/h=0.2$)

(1) 流速分布



(2) 乱れ強度分布

図-10 Bタイプ ($\theta=10^\circ$, $d/h=0.2$)

する。板の下方では反時計廻りの流れがみられる。一方岸側端を通過した水塊はそのまま進行し、流速が大きい時計廻りの流れが発生している。このとき岸側端やや下方を中心にかなり強い乱れが認められる。

その後、波の先端が板を越えし、板上に沿って冲向き、板岸側端より岸向き流れが生じ、乱れもそこで強くなる。こうして $t/T=1$ では $t/T=0$ と同じ状態が繰り返される。

図-9および図-10は、 $l/L=0.33$, $d/h=0.2$, $\theta=10^\circ$ の諸元をもつBタイプの場合について示したものである。

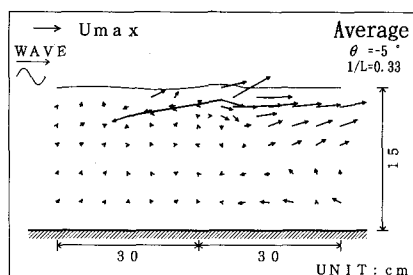
$t/T=0$ (図-9) では、同位相をもつ図-7に示したAタイプと比較すると、板上方および板より岸側水表面付近の流速が小さくなっている。しかし、板下面に沿う流速はAタイプのそれよりも大きくなる。乱れ強度についても、Aタイプが板上での碎波により水表面から板上にいたるまで比較的大きな乱れを生ずるのに対し、このBタイプでは、板中央の波頭部および板上下面の流速差や板下方の時計廻りの流れと板岸側での反時計廻りの流れが接する板岸側端では強い乱れが生じることがわかる。

$t/T=0.52$ (図-10) では板上方では冲向きおよび岸向き流れが存在し、板岸側端付近では上向き流れにより岸側端下方にあった渦が引き伸ばされたようになりやや上へ移動することが観察された。板の下方では、反時計廻りの流れが存在し、底部の方がやや大きな冲向き流れが生じている。

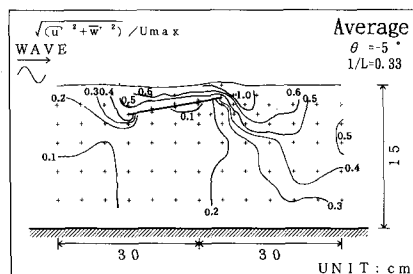
4.2 各測点における流速および乱れ強度の平均値の空間分布

図-11および図-12は、それぞれA, B両タイプに關する各測点における1周期間の平均流速すなわち恒流および乱れ強度の平均値を示している。

Aタイプ(図-11)の恒流ベクトルをみると、板上で碎波して岸側へ水塊が放り込まれ、水塊が水中でパウンドしたように垂下して、板より岸側にかなり大きな岸向きの一方向流が生じている。また、乱れの状況を見ると板上での碎波により板の上方および板の岸側端で強い乱れが存在することがわかる。しかし、板の下方では放り込まれた水塊に接しながら上昇流が生じ沖側へと流出していく様子が読み取れる。このとき板沖側端での流向は明確でなくなり乱れが認められる。一方、Bタイプ(図-12)では板の上、下方では岸向き流れを生じ、板の岸側でも時計廻りの上向き流が生じている。そのためかAタイプよりも板の岸側で水面上昇が生じている。板岸側端などでの乱れ強度がやや大きくなることもあるが、全般的にみれば乱れはAタイプよりも弱いことがわかる。

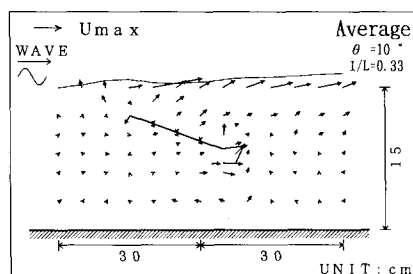


(1) 恒流分布

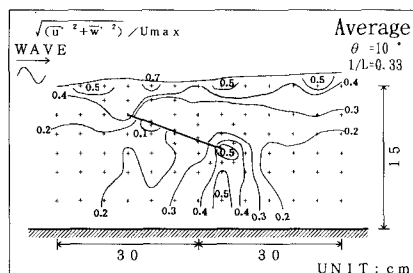


(2) 1周期平均乱れ強度分布

図-11 Aタイプ ($\theta = -5^\circ$, $d/h=0.2$)



(1) 恒流分布



(2) 1周期平均乱れ強度分布

図-12 Bタイプ ($\theta = 10^\circ$, $d/h=0.2$)

4.3 拡散係数による乱れ場の考察

水平および鉛直方向の流速記録から任意の測点における拡散係数 K を次式により算出した。

$$K = (1/2) \{ d\sigma^2/dt \} = \overline{u(t) \int_0^t u(\tau) d\tau} = \overline{u^2} \int_0^t R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (1)$$

表-2 拡散係数 (cm^2/s)

$-z$ (cm)	A タイプ $\theta=-5^\circ$				B タイプ $\theta=10^\circ$			
	沖側端		岸側端		沖側端		岸側端	
	K_x	K_z	K_x	K_z	K_x	K_z	K_x	K_z
0	235.6	87.4	284.9	20.9	102.3	54.0	64.6	22.8
1.3	—	—	238.9	36.7	—	—	—	—
1.5	—	—	—	—	248.8	97.6	—	—
2	181.0	243.2	70.3	7.6	—	—	—	—
3	268.7	299.5	46.4	8.9	111.9	223.4	41.4	26.4
4	105.9	88.3	21.9	9.9	—	—	—	—
5	—	—	—	—	21.8	24.5	97.2	76.3
6	15.6	21.5	8.8	5.9	—	—	—	—
6.5	—	—	—	—	—	—	299.2	200.6
7	—	—	—	—	9.2	10.9	—	—
8	—	—	—	—	—	—	173.0	4.3
9	6.8	7.5	6.8	2.2	5.0	5.1	80.5	6.8
12	4.3	4.3	6.1	0.5	3.2	2.1	23.7	2.8

ここで、 σ^2 は濃度分散、 $u(t)$ は時刻 t における流速、 $R(\tau)$ はラグランジュの相関係数が次式で表される。

$$R(\tau) = \overline{u(t)u(t+\tau)} / \overline{u^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここでは、通常のオイラー的相関係数を求めて $R(\tau)$ を代用している (矢野ら, 1978)。

表-2 は、 $l/L=0.33$ 、 $d/h=0.2$ の場合について、A、B 両タイプに対する水平拡散係数 K_x および鉛直拡散係数 K_z を板端上下の水深方向の測点で求めたものである。

A タイプ ($\theta=-5^\circ$) の沖側端での拡散係数値をみると、板端 ($z=-3\text{ cm}$) より上方での K_x の値はおおよそ $180\sim 270\text{ cm}^2/\text{s}$ 、 K_z は静水面 ($z=0\text{ cm}$) でやや小さいものの、おおよそ $90\sim 300\text{ cm}^2/\text{s}$ であり、いずれの値も板端でもっとも大きく、板の下方での値は急激に小さくなる。一方、岸側端での拡散係数の値をみると、板端 ($z=-1.3\text{ cm}$) 上方で K_x の値は $240\sim 280\text{ cm}^2/\text{s}$ をとるが K_z の値は $20\sim 30\text{ cm}^2/\text{s}$ と小さくなく、板端の下方での値は沖側端同様に急激に減衰する。

B タイプ ($\theta=10^\circ$) について沖側の板端 ($z=-3\text{ cm}$) より上方の値をみると、 K_x は $100\sim 250\text{ cm}^2/\text{s}$ 、水面ではやや小さいものの K_z は $100\sim 220\text{ cm}^2/\text{s}$ であり、板端では A タイプ同様鉛直方向の値は大きくなっている。しかし、板の下方での値は極端に小さくなる。一方、岸側端 ($z=-6.5\text{ cm}$) では、 K_x の値は $300\text{ cm}^2/\text{s}$ 、 K_z は 200

cm^2/s 程度にもなるが、板端を除く板上方の K_x および K_z の値は $100\text{ cm}^2/\text{s}$ 以下である。板端の下方 $z=-8\text{ cm}$ で K_x は $170\text{ cm}^2/\text{s}$ の値となっているが K_z の値はきわめて小さい。

5. 結 言

没水平板の岸側端を上げた A タイプおよび下げた B タイプの傾斜板について、消波特性に及ぼす板長、没水深および傾斜角度の影響を水平板と比較しつつ、それぞれの特性を考察した。また、消波効果のよい板長、没水深、傾斜角度をもつ A タイプの傾斜板ならびに海岸堤防や護岸からの反射波が A タイプの傾斜板に向う場合に当たる B タイプの傾斜板について板上での碎波や波形の変化、板周辺の流速、乱れの時々刻々の変化や恒流の空間分布を詳細に考察した。底面が砂質の場合など傾斜板の設置条件を変え流況や乱れの挙動をさらに明確にして、板下から底面付近に生息する微生物や魚類などにとってより良い生存環境の改良や創造へと発展させてゆきたい。

本研究にあたり、実験に協力された大林組正本美佳氏 (元徳島大学工学部学生) 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. 507-511.
- 高橋陽一・盛高裕生・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 傾斜板を用いた波浪制御構造物に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 519-523.
- 村上仁士・細井由彦・澤村賢行・池田良一 (1992): 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, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 571-575.
- 矢野雄幸・佐藤弘三 (1978): 拡散方程式入門, 公害研究対策センター, pp. 54-55.
- 山下誠也・櫻井清一・竹内浩一・宇多高明・小俣 篤 (1990): 傾斜堤の消波・波力特性の実用的算定法, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 574-578.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 特性曲線法を用いた没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.
- 余 錫平・磯部雅彦・渡部 晃 (1991): 没水平板に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 671-675.