

人工海底地形による波向制御に関する実験的研究

後野正雄*・榎木 亨**・小野正博***・藤原隆一****

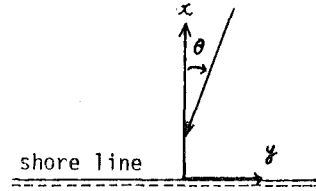
1. 概 説

防波堤は外界からの波を反射し、港内への進入を防ぐことによって港内の静穏化を図るものである。また離岸堤、潜堤は波高を減衰させることによって侵食対策などに用いられている。これ以外にも様々な波浪制御のための構造物があるが、そのほとんどは消波、反射あるいは波高の減衰を利用したものである。しかし、屈折や回折などの波向きを変化させる働きを利用しているものは非常に少ない。

波浪の特性を考えれば、波高以外にも波向、あるいは周波数を制御することも考えられる。本研究はこのうち波向に着目し、構造物によって人工海底を形成し、主に屈折を利用して波向を制御する方法について実験的に考察したものである。

波向が制御できれば、従来の構造物と同じく、様々な目的に利用することができる。本研究では波向制御構造物を海岸侵食対策に利用することを考える。すなわち、沿岸漂砂が卓越した海岸で、沿岸漂砂上手側において漂砂の供給源がたれたり、供給量が減少した場合に、下手側で急激な侵食や、侵食域の拡大が予想される。このような海岸においては、離岸堤や、潜堤が侵食防止のために用いられることが多い。しかし潜堤や離岸堤は漂砂に対する影響が大きく、いわば、副作用の強い対策工法であるとも考えられる。研究の最終目標とする構造物は、波向を制御することによって、漂砂下手側の急激な侵食の緩和、あるいは侵食域の拡大防止を図るものを考えている。

本研究はその基礎的段階として、規則波固定床における平面実験を行ない、沿岸流が沿岸漂砂を支配する最大の要因であることから、波向制御の効果を沿岸流流速の低減によって評価したものである。



図—1 座標系の定義

2. 波向の定義

波向き制御構造物を考える前にまず波向きの定義について考えてみる。特に、最近の計測機器の発達により、水平2方向の水粒子速度の観測が容易になっており、この水平2方向の水粒子速度(u, v)から波向きを定義する方法について述べる。

2.1 三次元波動場の水粒子速度場からみた波向

a) 三次元波動場の水粒子速度

3次元波動場の運動が微小振幅波理論で表せるものとし、静水面上の速度ポテンシャルを $\Phi = \Phi(x, y, t)$ で表示する。座標系は図—1 に示すように汀線上に原点を置き、沖向きに x 軸、沿岸方向に y 軸をとる。波向き θ は x 軸より時計回りに計るものとする。また、水粒子速度は x 軸方向に u (ただし向岸方向を正とする)、 y 軸の正の方向に v を取るものとする。 Φ は位相関数 $S(x, y)$ 、振幅 $a(x, y)$ を用いて次式のように表される。

$$\Phi = a \cdot \exp(iS + i\omega t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

水粒子速度(u, v)は速度ポテンシャルの定義より

$$u = R_0 \left\{ -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right\}, \quad v = R_0 \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。

b) 水粒子速度の位相面から見た波向き

前節で求めた水粒子速度(u, v)の1周期内の変化を u, v 平面上で描くと u と v の位相のずれにより楕円軌道を示すことになる。この楕円の長軸と u 軸のなす角度を θ_e とすると、 θ_e は次のように求められる。

$$\theta_e = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2(\partial S / \partial y)(\partial S / \partial y)}{(\partial S / \partial y)^2 - (\partial S / \partial x)^2 - \left(\frac{\partial a / \partial x}{a} \right)^2 - \left(\frac{\partial a / \partial y}{a} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工博 大阪工業大学講師 土木工学科

** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

*** 学生員 大阪大学大学院 土木工学専攻

**** 正会員 工修 東洋建設技術研究所

この θ_e は波のエネルギーが伝播する平均的な方向を表すものと考えて良い。一様水深部では (1) 式中の位相関数は次のように表わすことができる。

$S=kx \cos \alpha + ky \sin \alpha \dots\dots\dots (4)$

ここで α は従来波向として用いられてきた波峰線に垂直な方向を示している。さらに、波高が場所によらず一定であるとする θ_e は、

$\theta_e = \alpha \dots\dots\dots (5)$

となり、波峯線より定義される波向きと一致する。すなわち、従来波向として用いられてきた角度 α は、必ずしも波のエネルギーが伝播する方向を表すのではないことを意味する。本研究では、波向としてこの θ_e を用いることとする。

c) 実験値による θ_e の定義

実験において測定された水平方向粒子速度 (u, v) から波向 θ_e を求めるためには、 $u-v$ 平面における測定値の傾きを求めれば良い。最小 2 乗法を用いると θ_e は次のように与えられる。

$\theta = \tan^{-1} \frac{u'v'}{u'^2} \dots\dots\dots (6)$

ここに、 u', v' はそれぞれの平均値からの変動量を表わす。

図-2(a), (b) は実験で得た水粒子速度 (u, v) を $u-v$ 平面上に描いたものである。図中 u 軸、 v 軸に平行な一点鎖線はそれぞれ u, v の平均値 $\bar{u}, \bar{v}$ を示している。また図中の点は 29 波にわたる流速を 1/50 秒毎にサンプリングした (u, v) の値を示し、実線で描かれた楕円形の軌跡は、29 波の位相平均を施した (u_m, v_m) を表している。また、楕円の長軸方向に描かれた実線は θ_e の傾きを持ち $(\bar{u}, \bar{v})$ を通る直線である。図-2(a), (b) はそれぞれ $X/X_b=1.43, 0.86$ の結果である。ここで X は汀線から測点までの距離、 X_b は碎波点までの距離である。(a)

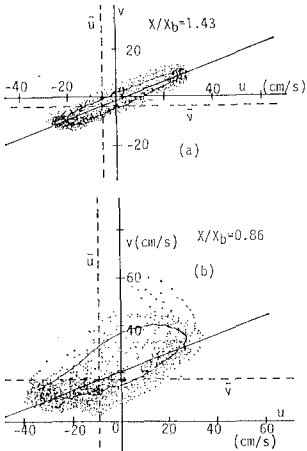


図-2 水粒子速度による波向角 θ_e の定義

は碎波点よりやや沖側の測定結果であるが、明らかに (u, v) は楕円軌道を描き、先に示した 3 次元波動場の特性が現われている。(b) は碎波点より少し岸側での結果であり、図中の点がばらついていることから乱れの強い状態であることがわかる。しかし位相平均された流速はやはり楕円軌道を示している。

3. 実験装置及び方法

3.1 波向き制御構造物の概要

本実験では図-3 に示すような 2 種類の構造物を用いた。この図は 1/10 の一様勾配斜面上に構造物を設けた状態で示したものである。今後の説明のために図のように斜面に番号を付け、四角錐型を構造物 A、三角錐型を構造物 B と呼ぶことにする。構造物の大きさは深海波の波長程度を想定している。また構造物 A と構造物 B の体積の比は 5 : 4 でやや A の方が大きい。構造物 A、構造物 B ともに構造物の頂点から岸向きに延びる稜線は水平 (以下水平稜線と呼ぶ) とし、各斜面とも実際に施工されることを考慮して緩斜面とし、最も急な斜面でも勾配は 1/3 以下とした。参考のため等深線も図中に示してある。

今、図-3 の矢印で示す方向から波が入射する場合を考える。構造物がない場合には、沿岸流は図の下側から上向きに生じる。構造物 A を設置したとき、沿岸流を抑える方向に波が屈折するのは、斜面①③を波が通過する場合である。この面を通過するとき、波は汀線に直角ないしは下向きに波向を変化させる方向に屈折する。しかし、斜面②④のうへを波が通過する場合には、波は汀線と平行な方向に屈折し、沿岸流を助長することになる。従って、沿岸流を抑制する効果を高くするためには、斜面①③をできる限り広くする必要がある。また、構造物 B では、稜線を汀線に対して 10 度傾けて設置し、入射波に対して斜面①が広がるように考慮した。

3.2 実験方法

水槽は幅 21 m × 18 m の平面水槽で、造波板の手前か

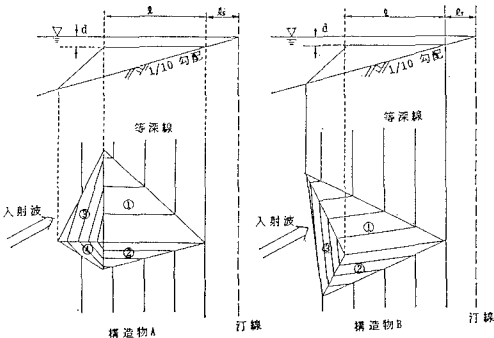


図-3 構造物の概要

表-1 構造物Aの実験ケース

d/L_0	ℓ/L_0 0.93	0.62	0.46
0.015	Aaア	Abア	Acア
0.030	Aaイ	Abイ	Acイ
0.060	Aaウ	---	---
T (sec)	0.91	1.12	1.29
L_0 (cm)	130	195	260
H_0 (cm)	3.9	5.9	7.8

表-2 構造物 B

d/L_0	ℓ/L_0 0.93	0.62	0.46
0.015	Baア	---	Bcア
0.030	Baイ	---	Bcイ
0.060	Baウ	---	---
T (sec)	0.91	---	1.29
L_0 (cm)	130	---	260
H_0 (cm)	3.9	---	7.8

ら 1/100 の勾配がつけられている。造波板は汀線に対し 20° 傾けた。壁面近傍にはフィルターや消波ブロックを設けて、壁面からの反射の影響をできる限り少なくした。

模型構造物は厚さ 1.2 cm のベニヤで作製し、表面をペンキ塗装し、非透水とした。構造物は勾配 1/10 の斜面上に同じ大きさのものを等間隔に 6 個設置し、群体としての効果を調べた。計測においては、沿岸方向には周期的な特性が表れるものと考え、中央部の隣りあう構造物の稜線間に測線を設けて測定した。

波高と流速は同時に測定し、波高計は容量式、流速計は 2 方向電磁流速計を用いた。流速計は、汀線からみて、波高計の左 4 cm の位置に設置し、波高計を測線上に設置した。1 測線について測定点数は 25 点で水深 26 cm (汀線から水深 260 cm) から水深 2 cm (汀線から 20 cm) までを沖側から 10 cm ずつ移動して測定した。実験ケースは入射波の波形勾配を $H_0/L_0=0.03$ (一定) とし、構造物 A に対しては表-1 の 7 ケース、構造物 B に対しては表-2 の 5 ケースとした。構造物 A に対しては周期の異なる 3 種類の波 (a, b, c) と天端水深 d/L_0 を 3 種類 (ア, イ, ウ) を考える。ケース名として例えばこれを A a イ というように表す。A は構造物 A, a は波の種類, イは d/L_0 を示す。また, 0 A a は構造物 A に関する実験で構造物がなく、波 a での実験であることを示す。

4. 実験結果ならびに考察

実験の結果において、構造物の種類や、設置水深などによる実験結果の相違は顕著ではなかった。そこで、人工海底を設置した場合にどのような波浪特性や、流れの特性が生じているかを主に説明していくことにする。

4.1 波高、平均水位の変化について

図-4、図-5 はそれぞれ構造物 A を設置した場合の波高変化 H/H_0 、平均水位の変動量 $\bar{\eta}$ の一例を測線毎に示したもので、原点の位置と測線の位置を一致させてある。波の特性と構造物の特性は 図-4, 5 も同じものである。図中白抜きの記号は構造物のない自然海岸の結果を示し、黒塗りの記号は構造物をおいた場合の結果である。また、構造物の外形と稜線の位置も示してある。

構造物を設置しないときの波高、平均水位変動の分布を見ると、若干の差異があるものの、どの測線もほぼ同様の値、傾向を示しており、特に実験の障害となるような水槽の特性はみられなかった。

構造物がある場合において、波高の変化 (図-4) をみると、屈折による波の収斂が生じる稜線上 (図中両端の測線) では、自然海岸に比べて、構造物の頂点付近で波高が大きくなる。目視観測では、この直後に碎波が生じているが、波高はあまり減衰していない。これは 図-3 に示したように、構造物上では、測線方向に水深が一定であるためと考えられる。一方、中央部の測線では、屈折による波の発散のため、構造物上から汀線側にかけて波高が小さくなっていることがわかる。しかし、目視観測による碎波点位置と、波高分布において最大値が現れる位置とは必ずしも一致していない。この点については後述する。いずれの測線においても、汀線に近づくにつれ波高は構造物のあるなしに係わらずほぼ同じになっている。この領域は構造物の設置されている領域より汀線側に当たり、波高は水深が浅くなると水深のみによって決定されるという性質が現れたものと考えられる。

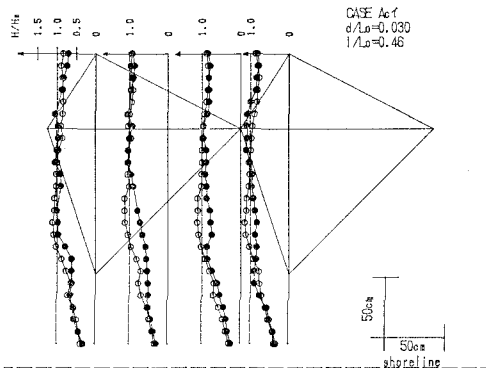


図-4 測線上の波高分布

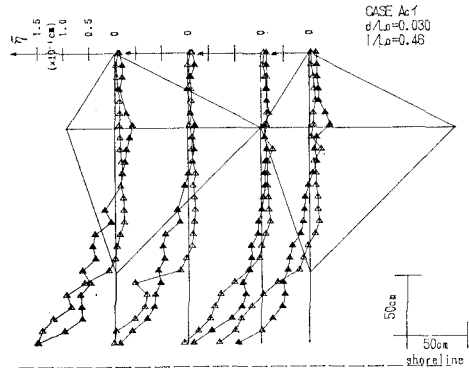


図-5 測線上の平均水位の変動量

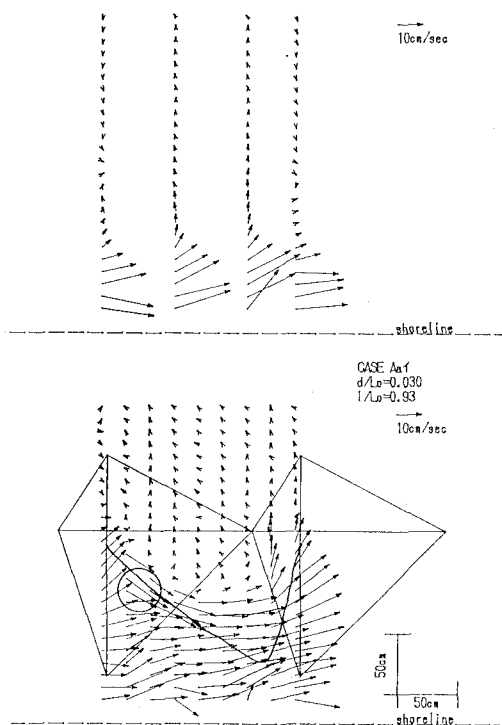


図-6 平行流速の平面分布

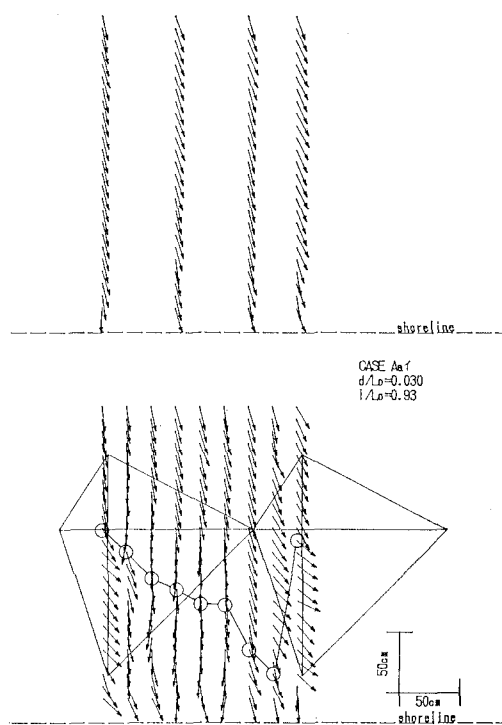


図-7 波向の平面変化

図-5 の平均水位の上昇についてみると、いずれの測線においても、平均水位の上昇が自然海浜の場合よりも沖側で生じている。この水位上昇の生じる地点は目視観測による碎波点位置とはほぼ対応している。しかし、その上昇は穏やかに生じ、汀線近傍での水位上昇量は自然海浜の場合より小さくなっている。

4.2 沿岸流と波向の変化

図-6 は各測点で求めた平均流速をベクトルとして表したものであり、図中、上の図は自然海浜の結果を、下図は人工海底の場合の結果を示している。

まず、人工海底の場合の全体的な流れの特性を左からみていくと、左端の水平稜線近傍では、やや沖向の流れが現れている。ついで、この流れは、岸向に変化しつつ、流速が大きくなる。流れがさらに進み、図の中央部に達すると、汀線と平行方向に向きを変え、沿岸流外縁部が汀線に近づいている。流れが隣の構造物の水平稜線の左側斜面上に近づくにつれて、沖側に向きを変え始め、左側斜面上では、強い離岸流が生じている。

図中に示した曲線は、目視観測による碎波線を示したものである。また丸印は、屈折により取れんした波が碎波し、強い水塊の突っ込みが観測された位置を表している。すなわち、水平稜線の左側で見られる離岸流は、この水塊の突っ込みによって向岸方向の流れへと変化する。この突っ込み点付近で形成された沿岸流は、そのまま流下

していく。碎波点が最も岸側へ近づいた付近では、沿岸流が碎波点よりもかなり沖側に現れているが、これは突っ込み点付近で形成される強い沿岸流に影響されて生じたものと思われる。このように、碎波点より沖側において強い沿岸流が発生する現象が報告された例は少ない。これは、従来の研究が汀線方向にあまり変化しない海底地形で行われたことが多かったためであろう。

図-7 は、式(6)で求めた波向 θ_0 を矢印で表示したもので、図-6 と同様、上の図が自然海浜の結果、下図が人工海底の場合を表している。構造物の水平稜線左側斜面上の測線（図中両端の2本ずつ）における波向は、自然海浜の波向と比べて、汀線と平行方向に大きく変化している。これは、屈折による変化に、図-6 に現れている離岸流による影響が加えられたものと思われる。一方、右側の斜面上においては、人工海底による屈折効果により、波向が汀線直角方向に変化している。

また、1つの測線上の波向を、沖側からみていくと、波向が汀線直角方向から平行方向へと急変している地点がみられる。図中に示した小さな丸はこの波向の急変点を示したものである。先の、図-6 に示した碎波線と、図-7 の波向の急変点は類似した変化を示し、両者が良く対応していることがわかる。式(3)の θ_0 の表示によると、波高の場所的な変化が大きいほど、 θ_0 は大きくなる。碎波点は一般に波高変化の急激な所であるが、図-4 に

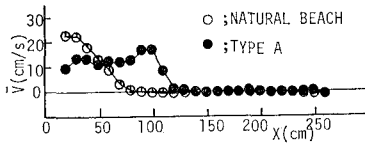


図-8 沿岸流の岸沖方向分布

示した波高分布から分かるように、本実験では構造物を設けた場合には目視観測による碎波点近傍での波高変化が顕著ではない。従って、この波向の急変は、碎波後の乱れや、沿岸流の干渉効果によるものと思われる。自然海浜では、碎波点近傍で波高の急変点がみられる。目視観測では、図-6 に示した水塊の突っ込み点より右側（沿岸流下手側）では、その左側における碎波の影響を強く受けているように見受けられた。図-6, 7 の中央部での碎波が、水平稜線右側の碎波の影響による強制碎波であると仮定すれば、波高分布中の最大波高の現れる地点と碎波点と一致しないことの理由の一つとして考えられよう。しかし、現段階では明らかではない。

4.3 沿岸流の低減効果

図-8 は、図-6 の平均流速の結果の内、特定の測線（左から4本目）の沿岸流の岸沖分布を示したもので、図中白丸が自然海浜、黒丸が人工海浜での結果である。この図を見ると、人工海浜上での沿岸流は自然海浜での結果と比べて、かなり沖側で最大流速が発生し、それより岸側では、一定の流速を示す領域が存在する。さらに汀線に近づくと、沿岸流は小さくなる。この特性はいずれの測線でも同様であるが、水塊の突っ込み点近傍ではこの特性がより明確であり、突っ込み点から沿岸流下手側へ離れるに従って、沿岸流の分布が一様分布に近くなる。沿岸流の最大値のみを人工海浜、自然海浜と比較すると人工海浜の方が小さくなっている。

次に、構造物の形状や、設置位置による沿岸流の低減効果について考える。沿岸流の岸沖分布やその分布中の最大値は測線毎に異なるので、測線毎の沿岸流の岸沖分布中の最大値を平均した $\bar{v}_{\max}$ を用いて、一つの実験ケースにおける代表沿岸流速とした。なお、平均の際、各測定の間隔を重みとして重み付き平均を用いた。

図-9 はこのようにして求めた各人工海浜での $\bar{v}_{\max}$ と自然海浜での $\bar{v}_{0\max}$ の比を表したもので、横軸には汀線から構造物先端までの距離 l_s と自然海浜での X_b の比である。また図中の白丸は構造物Aの結果であり、黒丸は構造物Bの結果である。図中低減率 $\bar{v}_{\max}/\bar{v}_{0\max}$ が1.0に近い二つのケースはともに無次元天端水深 $d/L_0=0.03$,

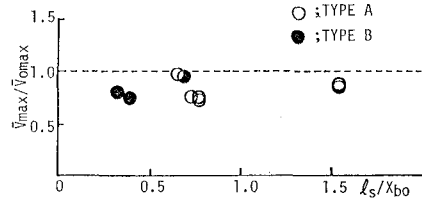


図-9 人工海底地形による沿岸流の低減率

構造物のスケールと沖波波長の比 $l/L_0=0.46$ のケースである。その他のケースは $l/L_0>0.62$ であるか、または $d/L_0=0.015$ であり、その低減率は d/L_0 や l/L_0 に関わらず約 0.75 程度である。すなわち、構造物のスケールが波のスケールに比して大きく、天端水深が小さい場合には、沿岸流は人工海底地形を形成することによって低減できる。特に構造物のスケールを沖波波長の半分以上にすれば、沿岸流の低減が期待できるものと思われる。

沿岸流の低減効果を評価する方法として、ここで用いた沿岸流の最大値の重み付き平均が適切な方法であるかどうかは議論の余地があり、今後の課題の一つである。

5. 結 論

波向を制御することによって沿岸流を低減することを目的とし、構造物を用いて人工の海底地形を形成し、屈折を利用して波向を制御することを試みた。

実験により2種類の構造物を用いて波向の制御と沿岸流の低減について調べたところ、構造物のスケールが沖波波長程度、無次元天端水深が 0.06 以上の条件において、沿岸流が自然海浜の2割程度低減できることが分かった。

しかし、沿岸流は自然海浜より岸沖方向に広い領域で発生し、この結果がそのまま沿岸漂砂の低減につながるとはいえない。特に、比較的深い領域で生じている沿岸流の鉛直方向の特性や、岸沖方向の沿岸流の分布が沿岸漂砂に与える影響を調べる必要がある。

また、本研究で用いた構造物が最適な波向制御構造物とは考えられない。波浪・流れの場の全ての特性を考慮した、より効果的な構造物を開発できる可能性があるとと思われる。

最後に、本研究を遂行するに当たり、終始ご協力を得た東洋建設技術研究所の方々と、貴重なご助言を載せた大阪大学出口助教授に謝意を表するとともに、実験及びデータの整理に当たり大阪大学大学院杉中君の多大な協力があつたことを記す。