

テーパー型潜堤による海浜地形制御の試み

武 若 聡*・入 江 功**・山 口 洋***

1. 緒 言

沖合人工島、離岸構造物等が建設されると海浜へ入射する波の特性が変化し、汀線と海浜の形状が変動する場合がある。その海浜変動は沿岸漂砂が支配的であることから、海浜への入射波高、入射角ならびに海浜流場を制御し、沿岸漂砂の沿岸分布特性を建設前の状態に近づけることができれば、汀線形状および海浜地形の変動を抑えられると期待される。このような海浜地形制御の実現に向けた技術要素の一つとして、著者らは三角形の平面形状を有するテーパー型潜堤を提案し、テーパー型潜堤が波向制御機能を有すること（武若ら, 1994a）、沖合に設置したテーパー型潜堤が発達した沿岸流を低減し得ること（武若ら, 1994b）をこれまでに確認してきた。

本研究ではテーパー型潜堤を用いて汀線形状ならびに海浜地形を制御することの可能性について移動床実験を通じて検討する（図-1参照）。また、実験で得られた地形上の波浪場と海浜流場を数値計算により求め、地形が形成された過程について論じる。

構造物を用いた波向制御に関する研究はこれまでも行われてきた（例えば、中村ら, 1992；後野ら, 1990）。しかしながら、積極的に波向制御された波を移動床の斜面に作用させ、そこに形成される波と流れ場、地形について調べられた研究例は少なく、波向制御構造物を用いた海浜地形制御に関する知見の蓄積は乏しい。例えば、波向制御する際に波高は維持すべきか、あるいは減衰させるべきか、年間のどの波候時期にねらいを定めて制御効果を高めるべきか等、答えを用意しなければならない点は数多くある。本研究では波向制御構造物を用いた海浜地形制御の実現に向け、基礎的な知見を取得し、克服すべき点を明らかにすることを目指す。

2. 移動床実験

(1) 実験装置と方法

本研究では初期に沿岸方向に一樣な海浜の沖合にテ-

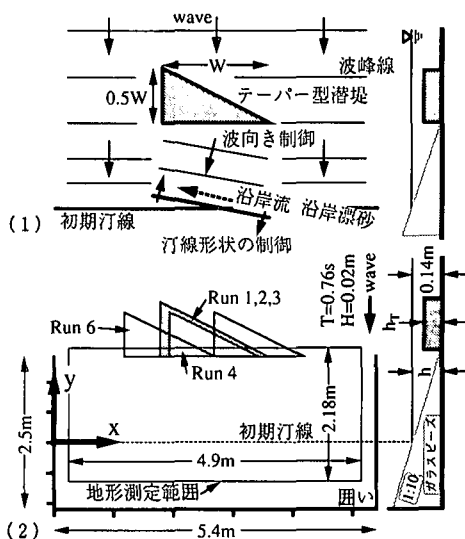


図-1 (1) テーパー型潜堤を用いた海浜地形の制御
(2) テーパー型潜堤の配置

ーパー型潜堤を設置し、入射波の海浜への入射角を偏向し、沿岸流と沿岸漂砂を発生させ、汀線と海浜の形状を制御する（図-1(1)）。この設定は、テーパー型潜堤が有する漂砂発生能、これに応じて生じる海浜変形の特徴等の基本的な事項を確認することを目的としており、直線状に安定している現実の海浜にテーパー型潜堤を設置して地形制御を行うことを想定したものではない。なお、本研究で用いたテーパー型潜堤の平面形状は全て幅 W 、奥行き $0.5W$ である。

実験は平面水槽内（幅9m）に囲い（幅5.4m、長さ2.5m）を設けて行った（図-1(2)）。囲いの外側側方と背後には消波材を設置した。底質としてガラスビーズ（中央粒径0.09mm、比重2.52）を採用し、勾配1/10の初期地形を造成した。一樣水深部の水深を0.14mに設定し、先ずテーパー型潜堤を設置しない状態で規則波（周期0.76s、一樣水深部での波高0.02m）を2時間作用させ、岸沖漂砂を発生させて平衡状態に近い岸沖断面を造った。その後テーパー型潜堤を沖合に設置して波を8時間作用させた。海浜地形（水深）の測定には超音波式測深機を

* 正 会 員 工 博 九州大学助手 建設都市工学科

** 正 会 員 工 博 九州大学教授 建設都市工学科

*** 学生会員 九州大学大学院

表-1 実験に用いたテーパー型潜堤

Run	潜堤幅 W	潜堤高 h_T	無次元 天端水深	地形測定 時間	潜堤上 砕波
1	1.8 m	0.084 m	0.4	2, 6, 10 hr	無
2	1.8 m	0.084 m	0.4	2, 6 hr	無
3	1.8 m	0.112 m	0.2	2, 6, 10 hr	有
4	1.5 m	0.084 m	0.4	2, 10 hr	無
5 ^a	1.5 m	0.084 m	0.4	2, 6, 10 hr	無
6 ^b	1.5 m	0.084 m	0.4	2, 6, 10 hr	無

a: Run 4 で用いた潜堤を逆向きに設置

b: Run 4 で用いた潜堤を2基連続設置

用いた。図-1(2)に示す範囲内の x 方向(沿岸方向, $0.25 \leq x \leq 5.15$ m)に99測線(5 cm 間隔)を設定し、各測線(y 方向, 岸沖方向, $-0.5 \leq y \leq 1.68$ m)の110点(2 cm 間隔)にて水深測定を行った。波浪と流れの目視観察は随時行った。

実験はテーパー型潜堤の寸法(幅 W , 潜堤高 h_T)と設置状況を変化させた6ケースについて行った。表-1にテーパー型潜堤の寸法, 潜堤の設置状況等を示す。無次元天端水深は天端水深を設置水深で除したものである。

Run 1 で用いた潜堤の幅 W は入射波長(0.75 m)の2.4倍あり、潜堤上で砕波は生じなかった。Run 2 はRun 1 と同一の条件下で実験を行い、地形変動の再現性を確認した。Run 3 に用いた潜堤はRun 1 と同じ平面形状の堤体ながら堤体高を増してあり、潜堤上で砕波が生じた。

Run 4 に用いた潜堤はRun 1 と比較すると W が小さい(入射波長の2倍)。Run 5 はRun 4 で使用した潜堤を逆向($x=2.7$ m で沿岸方向に折り返し)に設置し、水槽内に生じる固有の波浪場、流れ場が地形変動に及ぼした影響の程度を調べた。Run 6 ではRun 4 で使用した潜堤を2基連続設置し、地形変動が生じる範囲と規模が拡大する状況を調べた。

(2) 実験結果

図-2にRun 4の $t=2$ hrにおける海底地形(水深)の等高線図を示す。汀線位置を太線で示した。岸沖方向の底質移動が進行し、弱いパー型の地形が発達している。汀線位置は初期汀線の位置($y=0$)よりも後退している。等深線は汀線とほぼ平行であり、波の入射方向と直交している。各Runの $t=2$ hrの時点で得られた地形はこれとほぼ同じであった。

Run 1, 4, 6の $t=10$ hrの時点における海底地形の等高線図を図-3, 4, 5の上段に示す。各Runともに $t=10$ hrの時点で地形変動はほぼ終了していた。各図の下段には $t=2$ hrと $t=10$ hrの時点における地形測定結果を比較して求めた総沿岸漂砂量 Q_x の沿岸方向分布を示す。

総沿岸漂砂量 Q_x は次の手順で求めた。底質の連続条

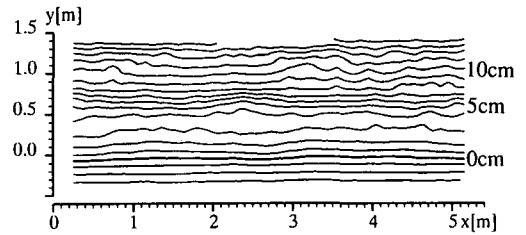


図-2 海浜地形 (Run 4, $t=2$ hr), 等高線間隔: 1 cm

件は次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h は水深、 q_x , q_y はそれぞれ x , y 方向の局所漂砂量、 t は時間である。上式を y 方向に積分すると次式を得る。

$$\int_{y_0}^{y_1} \frac{\partial h}{\partial t} dy = \int_{y_0}^{y_1} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 y_0 と y_1 は実験を行った間に地形変動が生じていないとみなせる岸側と沖側の限界で、 $y=y_0$, $y=y_1$ 上では $q_y=0$ となる。次に以下の変数

$$A = \int_{y_0}^{y_1} h dy, \quad Q_x = \int_{y_0}^{y_1} q_x dy$$

を定義し、式(2)を沿岸方向(x 方向)に積分すると

$$\int_{x_0}^x \frac{\partial A}{\partial t} dx = Q_x(x) - Q_x(x_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。 Q_x が局所沿岸方向漂砂量 q_x を岸沖方向に積分した総沿岸漂砂量であり、 A は岸沖方向の静水面から海底面までの間の断面積である。本研究では $x_0=0.25$ mにおける総沿岸漂砂量を0と仮定し、総沿岸漂砂量を次式から求めた。

$$Q_x(x) = \int_{x_0}^x \frac{\partial A}{\partial t} dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

実験結果を用いた計算では上式を離散化し、 $y_0=-0.3$ m, $y_1=1.3$ mとして各測線における $t=2$ hrから $t=10$ hrにかけての断面変化量を求め、これを沿岸方向に積算して Q_x を求めた。

以下に各Runの結果について説明する。

Run 1 (図-3): テーパー型潜堤を設置後の波動場は複雑であった。潜堤の高さが比較的低いために、波向制御された波の明確な波峰線の連なり(=等位相面の形成)は観察されなかった。砕波点位置は沿岸方向に変動し、砕波波高が相対的に大きくなる領域は水槽の中心($x=2.7$ m)よりも x の負方向(図中で左方向)に偏っていた。海浜地形の変動は潜堤背後の波向制御効果が及んでいた領域($1.5 < x < 2.8$ m)を中心に生じた。この範囲内では実験が進行するのに伴い、汀線ならびにその前面の地形

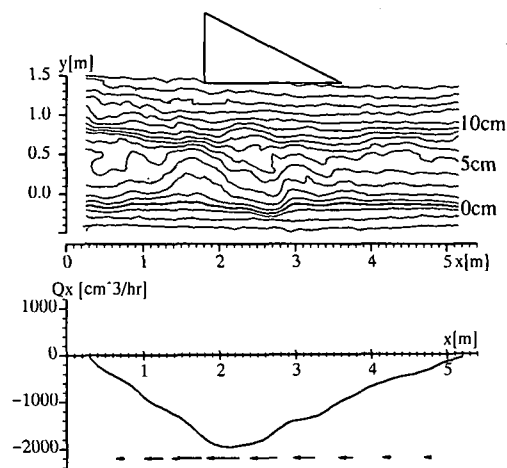


図-3 (1) 海浜地形 (Run 1, $t=10$ hr), 等高線間隔: 1 cm
(2) 総沿岸漂砂量 Q_x の分布

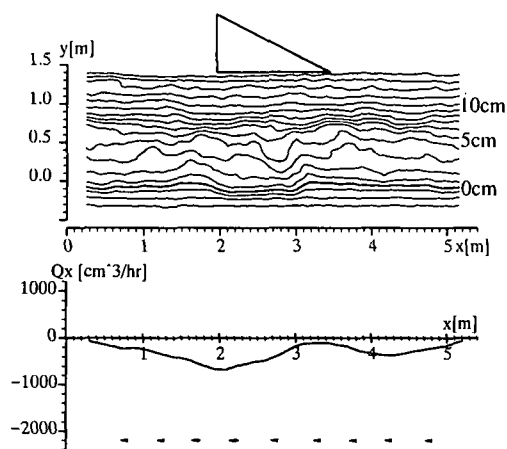


図-4 (1) 海浜地形 (Run 4, $t=10$ hr), 等高線間隔: 1 cm
(2) 総沿岸漂砂量 Q_x の分布

の等水深線が徐々に傾斜した。 $t=10$ hr における海浜形状に着目すると、 $1.6 < x < 2.8$ m の範囲の初期汀線 ($y=0$) に対する傾きが顕著である。

流況は碎波帯内に染料を注入して観察した。碎波波高が沿岸方向に変動したのに対応して、複数の海浜流セルが発生していた。顕著な離岸流は碎波波高が小さくなる領域に、向岸流は碎波波高が大きくなる領域に生じていた。沿岸方向の流れは地形が沖側に発達した領域 ($x=1.7$ m 付近) で非常に弱くなり、ここに到達する波の波高が小さいかったことと合わせて、底質の堆積が容易となる環境が形成されていたと考えられる。なお、海浜地形と波・流れ場の関係については後に数値計算結果を用いてより詳しく説明する。

総沿岸漂砂量 Q_x は $x=2$ m 付近にピークを持ち、潜堤背後では底質が x の負の方向に輸送されていた。Run 2

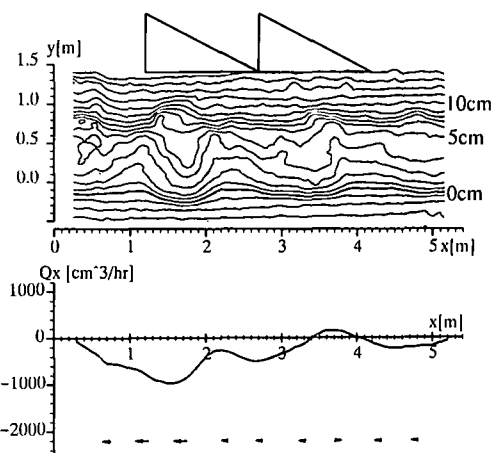


図-5 (1) 海浜地形 (Run 6, $t=10$ hr), 等高線間隔: 1 cm
(2) 総沿岸漂砂量 Q_x の分布

における $t=6$ hr の時点までの海浜変形の経過はこの実験とほぼ類似しており、実験の再現性は確保されていたと判断した。

Run 3: テーパー型潜堤を海浜地形の制御に用いることを考える場合、波向制御された波の波高の合理的な設定については現時点で不明である。ここでは潜堤上で碎波を生じさせ、海浜に入射する波の波高が減じたことによる影響を調べた。

波がテーパー型潜堤上を通過する際に碎波が生じた。これに伴い、潜堤通過後の波の波高は減衰していた。波峰線が傾く様子が非碎波の時に比べて非常に明瞭になった。この波向制御された波に加えて、円筒状の波面を有する散乱波の発生が顕著になった。

波向を制御された波が汀線近傍に到達する領域は Run 1 と比較してやや x の負方向に移動していた。ここに到達する波の波高は沿岸方向に一樣に小さく、顕著な海浜変動は生じなかった。地形変動が顕著であったのは左側の側壁付近であり、地形が沖側に堆積した。これは、潜堤からの散乱波が側壁により反射され、側壁に沿った比較的強い沖向きの流れが発生していたために生じたと推測している。このことは実験区間の幅が十分に広げられ生じないと考えられ、実験装置の設置上の制約から生じる問題である。

本研究では実験に際しての種々の縮尺条件が厳密に吟味されておらず、ここで設定した水理条件では潜堤上で碎波が生じると、汀線近傍での波が小さくなり底質が十分に動かなかった。実験では、碎波帯の形成、その中での沿岸流場の発達、碎波帯外での砂澁の出現等、移動床実験においてポイントとなる主要な現象は再現されていたものの、底質の移動限界に近い水理条件が汀線近傍で容易に生じる環境にあったと思われる。今後縮尺スケ-

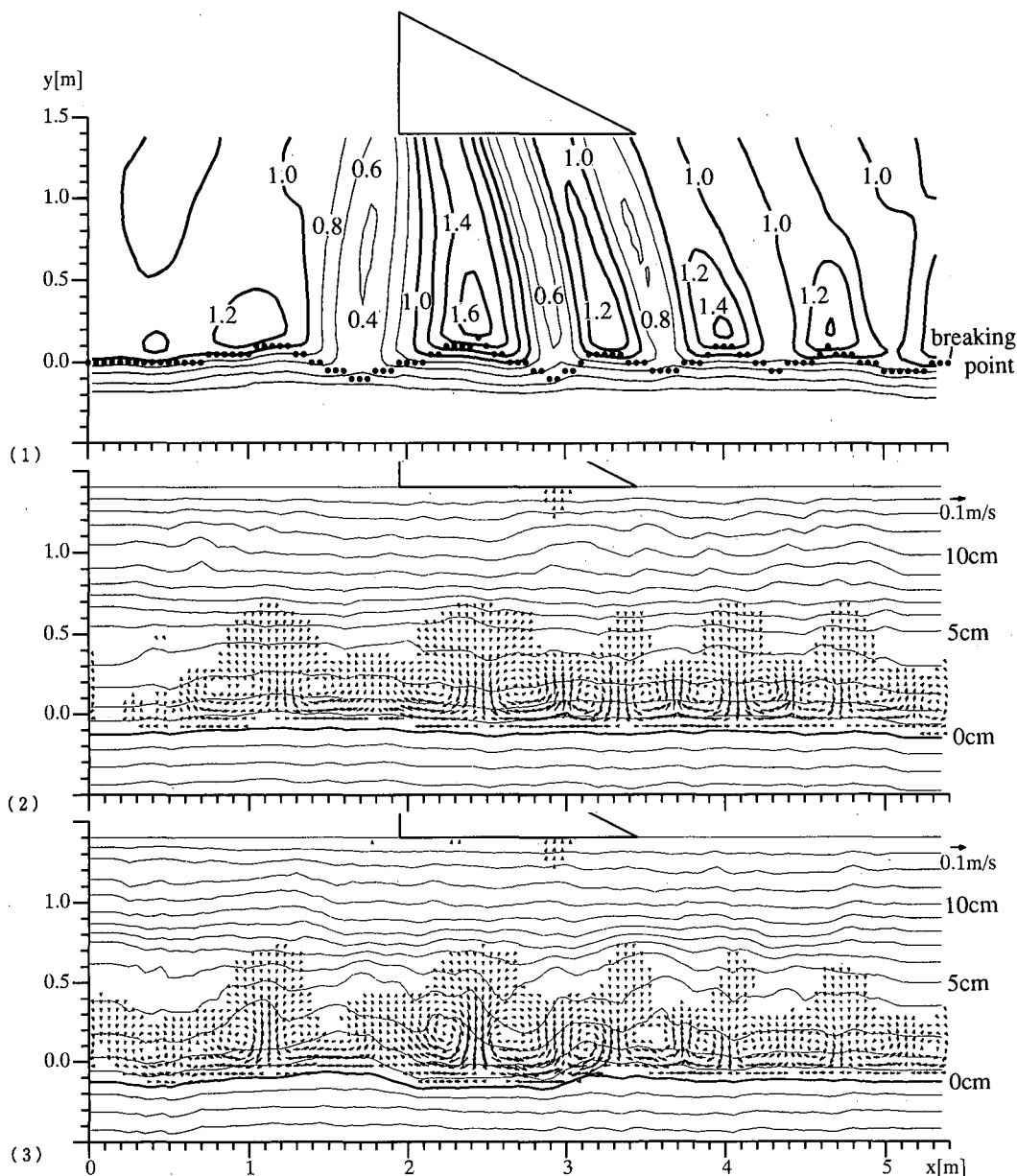


図-6 計算結果 (Run 4)

 (1) 無次元波高分布 ($t=2$ hr), 等高線間隔: 0.2 (2) 海浜流場 ($t=2$ hr) (3) 海浜流場 ($t=10$ hr)

ルを大きくした検討を行い、潜堤上で碎波を生じさせ、波向に加えて波高も同時に制御することが地形制御を行う上で有利となるか否かについて確認する必要がある。

Run 4(図-4)：潜堤背後の波浪場、流れ場の状況は先に説明した Run 1 の状況と類似していた。波向制御が行われていたと判断される範囲は潜堤幅の縮小に伴い減少していた。 $t=10$ hr の時点での海浜地形の特徴も Run 1 で得られたものと同質であり、異なるのは海浜地形の制御がなされたと見なせる範囲が狭まっている点である。

総沿岸漂砂量の分布状況も Run 1 の結果に類似している。ただし、潜堤幅が Run 1 に比較して小さくなったことに伴い、その最大値が小さくなっている。

潜堤の設置向きを沿岸方向に逆向きにした **Run 5** で得られた海浜地形は、ここで得られた地形を $x=2.7$ m の周りに折り返したものとほぼ一致していた。水槽に固有の水理現象が地形変動に及ぼした影響は少なかったと判断される。

Run 6(図-5)：Run 4 で用いたテーパー型潜堤を 2 基

連続設置して、地形変動が生じた範囲と規模を調べた。 $t=10$ hr の時点での地形は個々のテーパー型潜堤が影響を及ぼして形成されたものと考えられ、Run 4 で見られた地形パターンを沿岸方向に繰り返したものと見なせる。

総沿岸漂砂量の分布図には2つのピークが現れており、これらは個々のテーパー型潜堤による制御の結果を反映したものである。また、底質が有効に輸送されたと判断される領域も Run 4 の結果と比較すると拡大している。

3. 波と流れの数値解析

(1) 計算方法

ここでは測定された海浜地形上の波と流れの数値計算より求め、実験では捉えきれなかった観察結果の補足をを行い、波と流れの海浜地形の形成過程への寄与について考察する。波と流れの計算は武若ら (1994b) と同様の手順で行った。まず、ポテンシャル接続法 (吉田ら, 1992) によりテーパー型潜堤上の波動場の解を求め、これを放物型緩勾配方程式の初期値として代入して海浜上の波動場と Radiation Stress の分布を求めた。次にこれを入力条件として流れ場を ADI 法により求めた。側壁近傍の海浜地形は測定していなかったため、最寄りの測定値を x 方向に外挿して用いた。流れを計算する際には、 $y=1.4$ m の線上、両側壁、水深が 5 mm となる地点、のそれぞれを固定壁として扱った。

(2) 計算結果

Run 4 で測定された地形上の無次元波高分布 (入射波高 0.02 m で無次元化) と海浜流ベクトルを等深線と併せて図-6 に示す。碎波点位置の計算結果と実験結果には若干の不一致があったものの、計算された流れのパターンは実験で観察されたものと良く一致していた。まず、 $t=2$ hr の時点の地形に対する計算結果を見る。テーパー型潜堤を設置したことにより碎波波高の沿岸方向分布が不均一になり、碎波点位置を結んだ線は蛇行する (図-6(1))。潜堤背後 ($1.5 < x < 3.7$ m) の来襲波高の変動が顕著であり、波動運動が活発になる領域と静穏になる領域が交互に現れる。碎波波高が大きくなるのは計算領域の中心から x の負の方向 (図中で左方向) に偏っており、テーパー型潜堤の波向制御効果が現れている。実験では碎波波高が最も大きくなる $x=2.4$ m 付近の侵食がこの後進んだ。海浜流場には、波高分布が沿岸方向に変動するのに対応して、複数の海浜流セルが出現する (図-6

(2))。碎波波高が相対的に大きくなる領域で向岸流が、その両端には向岸流が発散する結果としての循環流が発生する。沿岸方向の波高分布、海浜流セルの配置と離岸流、向岸流が発生している位置関係を考えると次のような過程で地形変形が進むことが予想される。

- (i) 波高が大きくなる領域で底質が巻き上げられ、碎波波高が大きい領域から小さい領域に向かう沿岸流によって輸送される。この領域の海浜は欠損する。
- (ii) 輸送された底質は来襲波高が極端に小さくなり、離岸流が発生する領域に堆積する。ここの海浜地形は冲向きに発達する。

$t=10$ hr の時点の海浜地形に着目すると、以上の予想に従い $x=1.7$ m 付近に堆積領域が形成されている。この海浜地形上の海浜流パターン (図-6(3)) は $t=2$ hr の時点の結果と類似しているが、流速は沿岸方向の成分が全般的に低減している。これは、実験においてこの時点の地形変動が小さくなっていったことに対応していると考えられる。

4. 結 語

移動床実験を行い、沖合いに波向き制御機能を有するテーパー型潜堤を設置して波と流れの場を制御し、汀線形状と海浜地形を制御する可能性を示した。海浜変形の制御が達成された範囲と規模はテーパー型潜堤の堤体長と設置状況に依存した。テーパー型潜堤を2基設置した実験から、潜堤を連続設置し海浜地形を連続的に制御することへ向けての感触をつかんだ。数値解析により波と流れの地形形成に関する寄与を調べた。

最後に、本研究は運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所による受託研究の成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 武若 聡・入江 功・黒田 寛 (1994a): テーパー型潜堤による波向制御, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 726-730.
- 武若 聡・入江 功・辻 利徳 (1994b): テーパー型潜堤を用いた沿岸流制御の試み, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 731-735.
- 中村幸孝・長田和久・栗田清光 (1992): 矩形堤体列まわりの平面的な波変形の特性と波向き制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 536-540.
- 後野正雄・榎木 亨・小野正博・藤原隆一 (1990): 海底地形による波向制御に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 589-593.
- 吉田明徳・村上啓介・小野雅人 (1992): ポテンシャル接続法の選点解法による3次元波動境界値問題解析法, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 756-760.