

# テーパー型潜堤による波向き制御

武若 聡\*・入江 功\*\*・黒田 寛\*\*\*

## 1. テーパー型潜堤とは

従来より提案されている平面形状が矩形型の潜堤は沿岸に襲撃する波の大きさ、即ち波高を制御することを主な目的としている。本研究では非対称な形状を有するテーパー型潜堤を提案し、従来の潜堤が有する波高制御機能に加えて、波向き制御機能を持たせることの可能性について検討する。潜堤の一边を図-1に示すように傾けると、屈折の効果により潜堤上を通過した波の波向きが偏向される。同時に入射波の一部は反射され、さらに、堤体上水深が小さい時には堤体上で砕波が生じ、透過波の波高が減じる。本研究では、一定水深領域に設置されたテーパー型潜堤に単一方向規則波が入射する場合を扱う。実験および解析において、テーパー型潜堤周辺の波浪場の波向き分布を推定し、テーパー型潜堤の有する波向きおよび波高制御機能を評価する。

構造物を用いて波向きを制御する試みは、いくつかの研究例に見ることができる。後野ら(1990)は、砕波帯内に特殊な形状の潜堤を設置し、沿岸に入射する波の角度を制御して沿岸流を低減することを試みた。この際、潜堤の波向き制御効果を評価しているが、解析の対象となった波浪場は砕波を含んだ複雑なものであり、得られた結果の理解は容易でない。中村ら(1990, 1992)は、無限堤体列の波向き制御効果を調べた。ここでは、解析解から得られる関係を利用して、堤体列背後の波浪場の波向き特性が論じられている。ただし、この方法論を用いて、構造物背後の波向き制御効果を一般的に評価することはできない。

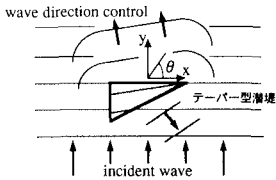


図-1 テーパー型潜堤による波向き制御

## 2. 規則重合波浪場の波向き分布推定法

不規則波浪場を対象とした方向スペクトルの推定に関する研究は数多く行われている(例えば、橋本, 1992)。これに対して、単一周期波が重合した波浪場の波向き分布の推定に関する研究は、著者らの知る限りでは存在しない。ここでは単一周期の波が重合した波浪場の波向き分布を推定する方法(武若, 1994)を用いてテーパー型潜堤周辺の波浪場の波向き分布を推定する。

実験、計算あるいは解析により単一周期から成る線型重合波浪場のM点(位置(x<sub>m</sub>, y<sub>m</sub>); m=1~M)での水位変動η<sub>c</sub>の振幅および位相が与えられているとする。

$$\eta_c(x_m, y_m, t) = A(x_m, y_m) \exp(-i\omega t); \quad m=1 \sim M \dots\dots (1)$$

ここに、Aは複素振幅(|A|:振幅, arg(A):位相), i<sup>2</sup> = -1, ωは角周波数, tは時間である。

この波浪場を、予め進行方向を指定したN個の進行波(波数k)の重ね合わせとして表現することを考える。

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^N a_n \exp\left(ik(x \cos \theta_n + y \sin \theta_n)\right) \exp(-i\omega t) \dots\dots (2)$$

ここに、(x, y)は水平方向座標, a<sub>n</sub>, θ<sub>n</sub>はn番目の波の複素振幅および進行方向(図-1参照)である。

a<sub>n</sub>は最小自乗法を用いて求める。進行波の重ね合わせにより得られる水位ηと与えられた水位η<sub>c</sub>の各位置(x<sub>m</sub>, y<sub>m</sub>)での誤差の総和

$$R = \sum_{m=1}^M \left( \eta_c(x_m, y_m, t) - \eta(x_m, y_m, t) \right)^2 \dots\dots (3)$$

が最小となるよう、a<sub>n</sub>を以下の連立方程式から求める。

$$\frac{\partial R}{\partial a_n} = 0; n=1 \sim N \dots\dots (4)$$

以上のa<sub>n</sub>に関する連立方程式を解くことにより、θ<sub>n</sub>方向に進行する波の振幅|a<sub>n</sub>|と位相φ<sub>n</sub> = arg(a<sub>n</sub>)が求まる。

\* 正会員 工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科  
 \*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科  
 \*\*\* 正会員 福岡市役所

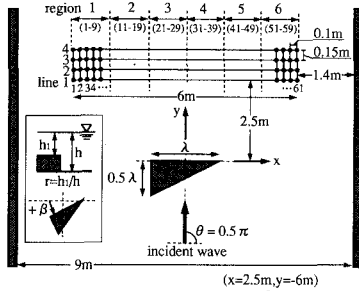


図-2 テーパー型潜堤の設置状況と水位分布の測定点 (●)

表-1 入射波の諸元, 堤体寸法と設置角度 (実験)

周期 ( $T$ )	0.76 s
水深 ( $h$ )	0.14 m
入射波高 ( $H_0$ )	0.01 m
入射波長 ( $L$ )	0.75 m
無次元波数 ( $kh = (2\pi/L)h$ )	1.17
入射波進行角度	$90^\circ (0.5\pi)$
堤体長 $\lambda (\lambda/L)$	1.8 m(2.4), 2.7 m(3.6)
無次元堤体上水深 $r$	0.5, 0.2
設置角度 $\beta$	$30^\circ, 15^\circ, 0^\circ, -15^\circ$

### 3. テーパー型潜堤の波向き制御効果

#### (1) 実験による波向き制御効果の確認

a) 実験方法と実験条件 実験は平面水槽(幅 9 m, 長さ約 18 m)にテーパー型潜堤を設置して行った。水槽の終端には木製の斜面を設置し, 反射波の発生を抑えるように努めた。水槽のほぼ中心にテーパー型潜堤を設置し, 潜堤周辺波浪場の観察, 潜堤背後領域の水位変動測定を行った。図-2 に堤体の設置状況と水位変動の測定位置, 表-1 に入射波の諸元, 堤体の寸法と設置角度を示す。実験は, 2 種類の堤体長, 2 種類の堤体高さ, 4 種類の設置角度の総計 16 case について行った。

水位は, 図-2 に示す堤体背後の  $61 \times 4$  点で, 容量式波高計を用いて測定した。波高計を  $y$  方向に 0.15 m の間隔で 4 台並べて固定した枠を作製し, この枠を  $x$  方向に 0.1 m 間隔で移動しながら, 測線 (line 1~4) に沿った潜堤背後の水位分布を測定した。また, 図中下方に示す潜堤の入射波側の 1 点 ( $x=2.5$  m,  $y=-6$  m) で水位変動を測定し, データ処理の際の基準信号に用いた。水位変動は, サンプリング周波数 50 Hz, 記録時間長 41 s でデータレコーダに収めた。造波は連続して行い, 1 つの実験条件について水位データを収集するのに約 2 時間を要した。

b) 目視による波浪場の観察 目視により観察された潜堤周辺の波浪場について記す。テーパー型潜堤上を通過する波の振幅は, 水深が減小することと集波効果により増大する。振幅が著しく増大した位置は, テーパー

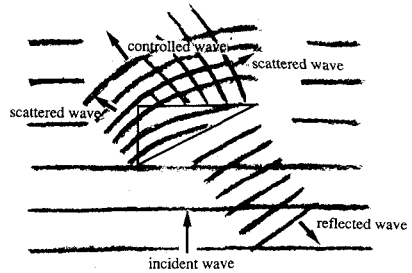


図-3 テーパー型潜堤周辺の波浪場のスケッチ (堤体:  $\lambda=1.8$  m,  $r=0.2$ ,  $\beta=0^\circ$ )

図中の線は, 観察される波紋を目視と写真から読み取って描いた。潜堤から発生する波の波長は非線形効果により入射波の波長に比べて短く見える。

型潜堤の寸法と設置角度により異なった。堤体上ではテーパー型潜堤が狙いとする屈折の効果が観察された。すなわち, 制御を望む方向に進行する波面の発生が認められ, これは堤体背後の領域に伝播した。

潜堤の背後左側の領域 (図-2 中,  $x < 0, y > 0$ ) には, 入射波と上に説明した堤体上から発生する波とが重なる波浪場が形成されていた。すなわち, 直進する入射波に, 制御を望む方向に進行する波が重合していた。この制御方向に進行する波は, ほぼ直線的な波峰線を有する波と曲線的な波峰線を有する散乱波から成っていた。堤体背後の右側の領域 ( $x > 0, y > 0$ ) では, 制御を望まない方向に進行する波の発生が観られた。これは, 曲線的な波峰線を有する散乱波であった。潜堤の前面では, 潜堤からの反射波の発生が認められた。以上の観察結果を模式的に示したのが図-3 である。

無次元堤体上水深が  $r=0.2$  の時には堤体上で砕波が生じた。砕波が生じると堤体背後に進行する波の波高が小さくなるものの, 波の発生パターン, 進行状況は上に記したのに一致する。

c) 水位変動データの処理と波向き分布の推定 前章に示した方法で波向き分布を推定するためには, 潜堤背後の各点の水位変動の振幅と位相が必要である。ここでは各点で収集した水位変動の時間記録を Fourier 解析することにより, その振幅と位相を求めた。具体的には, テーパー型潜堤の背後と前方で測定した水位変動を FFT により解析し, 入射波周期  $T$  に対応する成分の振幅  $A_{meas}$  と位相  $\alpha$  を求めた。次に, 潜堤背後の各点の  $A_{meas}$  を潜堤前方の測点で得られた振幅  $A_{0meas}$  で除することにより規格化した。また, 潜堤背後の各点で求めた  $\alpha$  から潜堤前方の測点で求めた位相  $\alpha_0$  を差し引くことにより, 潜堤背後の各点での位相を相対的に揃えた。このようにして求めた, 潜堤背後の測線 (line 1~4) 上の無次元振幅  $A_{meas}/A_{0meas}$  と位相  $(\alpha - \alpha_0)/\pi$  の分布を図-4 に例示する。

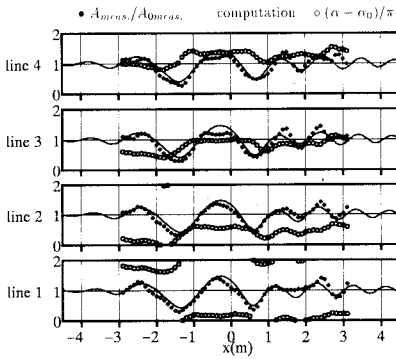


図-4 無次元振幅  $A_{meas}/A_{0meas}$  (●) と位相  $(\alpha - \alpha_0)/\pi$  (○) の分布。実線は計算から得られる無次元振幅 (堤体:  $\lambda=1.8\text{ m}$ ,  $r=0.5$ ,  $\beta=0^\circ$ )

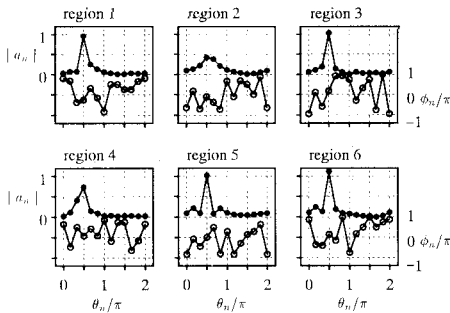


図-5 波向き分布の推定結果: ●  $|a_n|$ , ○  $\phi_n/\pi$  (堤体:  $\lambda=1.8\text{ m}$ ,  $r=0.5$ ,  $\beta=0^\circ$ )

ほとんどの測点では入射波周期  $T$  に対応する成分のエネルギー ( $\propto$  振幅) が卓越していた。しかしながら、一部の測点では非線形効果による影響が顕著であり、 $T/2$  の成分のエネルギーが相対的に大きくなった。この領域で詳細に波浪場を観察すると、入射波の波長よりも短い波長の波の発生が認められた。

波向き分布の推定は、図-2に示す小領域 (region 1~6) に行った。  $N=12$ ,  $\theta_n=2\pi(n-1)/N$  とし、推定に用いるデータ数は  $M=9 \times 4=36$  とした。  $N$  をより大きな値に設定し、波向き分布推定の方向分解能を高めることも試みたが、水位分布の測定密度が不十分であったために、これは困難であった。

図-5に各小領域の波向き分布の推定結果を示す。図中の横軸は  $\theta_n/\pi$  であり、図中の点は進行波成分 ( $a_1 \sim a_{12}$ ) の振幅  $|a_n|$  および位相  $\phi_n = \arg(a_n)$  を表す。 region 1 と 2 では  $|a_5|, |a_6|$  が  $|a_2|, |a_3|$  に比較して大きくなっており、ここでは制御を望む方向に進行する波が卓越していたと考えられる。これに対して region 4 は上とは逆の状況になっており、ここでは非制御方向の成分が大きくなっていった。また、region 2 と 4 では入射波方向の成分が小さくなっていった。

全ての実験 case に関する波向き分布の推定結果と目

視による波浪場の観察結果とを併せて考察すると、波向き制御効果は堤体が大きい時に、また、堤体上水深が小さい時に高まる。堤体の設置角度が及ぼす影響については、波向き分布の推定結果の精度が充分でなかったために、一般的な結論は得られなかった。

堤体上水深が  $r=0.2$  の時には堤体上で碎波が生じ、潜堤背後の波の振幅は小さくなった。この場合、波向き制御および碎波による波高制御が行われたことを示す推定結果が得られた。

(2) 解析解を用いた波向き制御効果の評価

a) ポテンシャル接続法 吉田ら (1992) により開発されたポテンシャル接続法は、水深がステップ状に変化する地形上の線形波浪場を正確に計算できる。ここでは、ポテンシャル接続法によりテーパー型潜堤周辺の水位分布を計算し、これを用いて波向き分布の推定を行う。

波向き分布の推定計算に先立ち、ポテンシャル接続法の計算精度を実験結果と比較することにより検証した。実験に対応する条件の計算を行い、テーパー型潜堤背後の無次元水位振幅の分布を求めた。計算結果は先の図-4中に示した。測定値と計算値の一致は良好であり、波浪場が線形の範囲内にあるとみなせる時には、ポテンシャル接続法によりテーパー型潜堤周辺の波の場は精度よく計算できる。堤体上水深が  $r=0.2$  の時には、実験値と計算値の不一致が目立った。実験では堤体上で碎波が生じており、この時波浪場の性質は線形の範囲から大きく逸脱していた。

b) 波向き分布の推定 ここでは実験を行った条件と比較して、より多くの堤体長、設置角度を設定して計算を行い、テーパー型潜堤背後と前面の波向き分布を推定する。図-6に全体の計算領域と波向き分布の推定を行った小領域 (region 1~16: 上, 1'~16': 下) を、表-2に計算を行った条件を示す。堤体の設置角度の定義が

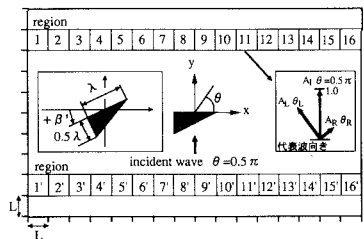


図-6 計算領域と波向き分布の推定を行った領域

表-2 入射波の諸元、堤体寸法と設置角度 (解析)

無次元波数 ( $kh=2\pi h/L$ )	1.20
入射波進行角度	$90^\circ$ ( $0.5\pi$ )
堤体長 $\lambda/L$	1, 2, 3, 4
無次元堤体上水深 $r$	0.5, 0.2
設置角度 $\beta$	$30^\circ, 15^\circ, 0^\circ, -15^\circ, -30^\circ$

実験の時と異なることに注意を要する。計算は、4種類の堤体長、2種類の堤体高さ、5種類の設置角度の総計40 case について行った。先の実験結果から判断すると、堤体上水深が  $r=0.2$ 、且つ入射波振幅が大きい時には堤体上で碎波が生じることが予想される。ここでは碎波の効果を無視した解析を行い、計算方法に碎波の効果を組み込むことは将来の研究課題とする。

波向き分布の推定は  $N=20$ 、 $\theta_n=2\pi(n-1)/N$  として行い、推定の際には各小領域内の  $18 \times 18$  の格子点上の複素振幅を与えた (格子間隔:  $L/20$ ,  $M=324$ )。解析結果を図-7 および図-8 に例示する。図-7(1) および図-8(1) にはテーパー型潜堤周辺の無次元水位振幅分布の等高線図を示す (図中の矢印の意味は後に説明)。また、図-7(2) および図-8(2) には潜堤背後の領域の波向き分布の推定結果を示す。

潜堤が周辺の波浪場に及ぼす影響は、堤体上水深が  $r=0.2$  の時に大きくなる。すなわち、潜堤背後で振幅が大きく、あるいは、小さくなる舌状の領域の出現が明確になり、また、潜堤前面では潜堤の斜辺から発生する反射波の存在が顕著になる。

波向き分布の推定結果に着目すると、潜堤背後の左側の region 1~8 では、 $|a_7| \sim |a_{11}| (0.6\pi < \theta_n < \pi)$  の値が  $|a_1| \sim |a_6| (0 < \theta_n < 0.4\pi)$  の値に比較して相対的に大きくなる。この場合、着目している小領域の波向き制御が達

成されていると判断される。逆に、region 9~16 の一部ではこの関係が逆転しており、これらの小領域では、非制御方向に進行する波が発生している。以上の波向き分布の推定結果の特徴は、堤体上水深が  $r=0.2$  の時により顕著になる。

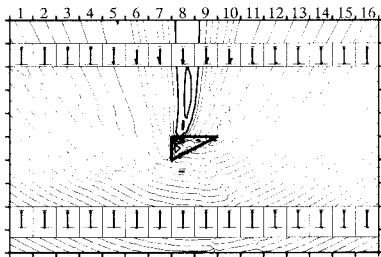
図-7(2) あるいは図-8(2) に示した波向き分布の推定結果の表示方法では、潜堤周辺の波浪場の状況を瞬時にイメージすることは難しい。そこで、潜堤背後の各小領域の波浪場を、

- (i) 入射波方向に進む成分 (振幅:  $A_I = |a_6|$ , 波向き:  $0.5\pi$ )
- (ii)  $0.5\pi \sim \pi$  方向に進む制御成分 (振幅:  $A_L$ , 波向き:  $\theta_L$ )
- (iii)  $0 \sim 0.5\pi$  方向に進む非制御成分 (振幅:  $A_R$ , 波向き:  $\theta_R$ )

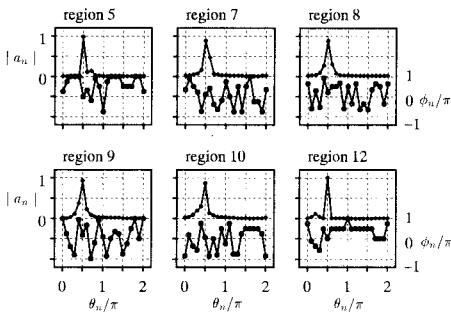
の3個の波の重ね合わせとして近似的に捉えることを考える (図-6 参照)。(ii) および (iii) の波は次のようにして求めた。例えば (ii) の成分を求めるときには、先ず、 $a_7 \sim a_{11}$  の進行波成分を重ね合わせて得られる、小領域内の各点の複素振幅  $A_{7-11}$  を求める。

$$A_{7-11}(x_m, y_m) = \sum_{n=7}^{11} a_n \exp(ik(x_m \cos \theta_n + y_m \sin \theta_n)) \dots \dots \dots (5)$$

次に、各点の振幅  $|A_{7-11}|$  および各点の位相  $\varphi =$

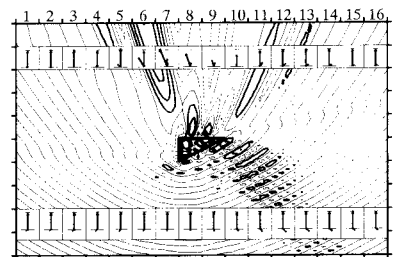


(1) 太線: 振幅 > 1, 細線: 振幅 = 1, 破線: 振幅 < 1, 等値線間隔 0.2

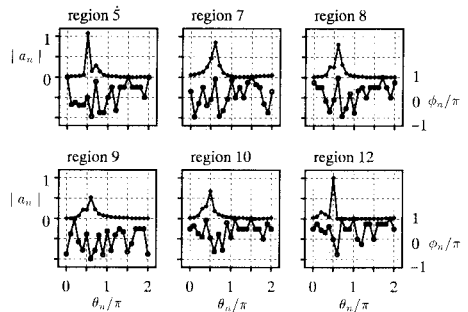


(2) ● |a\_n| ○ phi\_n/pi

図-7(1) 無次元振幅分布と代表波,  
(2) 波向き分布の推定結果  
(堤体:  $\lambda/L=2$ ,  $r=0.5$ ,  $\beta=0^\circ$ )



(1) 太線: 振幅 > 1, 細線: 振幅 = 1, 破線: 振幅 < 1, 等値線間隔 0.2



(2) ● |a\_n| ○ phi\_n/pi

図-8(1) 無次元振幅分布と代表波,  
(2) 波向き分布の推定結果  
(堤体:  $\lambda/L=2$ ,  $r=0.2$ ,  $\beta=0^\circ$ )

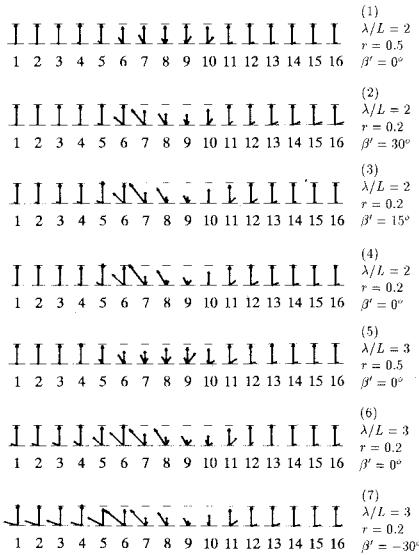


図-9 潜堤背後の代表波

$\arg(A_{7-11})$  の  $x$  および  $y$  方向の勾配  $\varphi_x, \varphi_y$  を求め、次の式から制御方向に進行する波の代表振幅  $A_L$  と代表波向  $\theta_L$  を評価した。

$$A_L = \sqrt{|A_{7-11}|} \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta_L = \tan^{-1} \frac{\varphi_y}{\varphi_x} \dots\dots\dots (7)$$

ここに  $\sqrt{\quad}$  は小領域内の平均をとることを意味する。(iii) の波の代表振幅  $A_R$  および代表波向  $\theta_R$  も以上と同様の計算により求めた。このようにして求めた波 (i), (ii) および (iii) を重ね合わせても、元の波浪場を正確に再現することはできない。これらは、波向き制御効果を計る指標としての代表波向き、として捉えるのがふさわしい。計算結果を詳しく検討したところ、 $A_L$  あるいは  $A_R$  と小領域内の各点での複素振幅の絶対値、 $|A_{7-11}(x_m, y_m)|$  あるいは  $|A_{1-5}(x_m, y_m)|$  との差は大きくても 20% 程度であった。潜堤前面の波浪場の代表波も同じ手続きにより求めた。

このようにして求めた代表波を視覚的に表示したものが、図-7(1) および図-8(1) 中の枠内の矢印である。矢印の大きさが代表振幅を、向きが波の代表波向きを表す。図中の上段は透過波の特性を示しており、潜堤背後左側の領域の波の制御状況が読み取れる。波向き制御効果は堤体上水深が  $r=0.2$  の時により顕著になる。図中の下段には潜堤の前面に発生する反射波の存在が示されている。

潜堤背後の代表波を求めた結果から代表的なものを図-9 に示す。これにより、テーパ型潜堤の堤体長 ( $\lambda/L$ )、堤体上水深 ( $r$ ) および設置角度 ( $\beta$ ) が波向き制御に及ぼす効果を探ることができ、以下の知見が得ら

れた。

- 堤体 ( $\lambda/L$ ) が大きくなる、また、堤体上水深 ( $r$ ) が小さくなるとテーパ型潜堤背後の波向き制御効果が高まる：(1), (4), (5), (6) の比較
- 波向き制御効果が波及する領域は、堤体の設置角度 ( $\beta$ ) により異なる：(2), (3), (4) の比較, (6), (7) の比較
- 非制御方向成分の発生は堤体上水深 ( $r$ ) が小さくなった時に顕著になり、また、これは堤体の設置角度 ( $\beta$ ) にも依存する：(1), (2), (3), (4) の比較

#### 4. 結 語

本研究では1基のテーパ型潜堤が有する波向き制御効果を実験と解析を通じて調べた。実験においては、テーパ型潜堤の背後に制御された波が発生することを確認した。解析ではテーパ型潜堤周辺波浪場の波向き分布推定を行い、潜堤の透過側と反射側の波の場を解析した。さらに、潜堤背後の代表波を求め、潜堤の波向き制御が高まる条件(堤体長、堤体上水深、設置角度)を調べた。

テーパ型潜堤を用いて波向き制御を図る場合には、設定した波浪制御目標、例えば、非制御成分の波の発生を抑えることを優先し制御成分の発生効率をこれのために犠牲にする、制御成分の発生および入射波方向成分の低減を優先する等に応じて堤体の寸法と設置角度を選定する必要がある。非制御方向の波の発生は複数のテーパ型潜堤を用いることにより低減できると予想されるが、これは今後の検討課題である。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。

謝辞：ポテンシャル接続法の計算プログラムは、九州大学助手 村上啓介氏の御好意により利用させて頂いた。ここに記して感謝致します。

#### 参 考 文 献

武若 聡(1994): 規則重合波浪場の波向き分布解析, 第49回土木学会年次学術講演会概要集 II-A.  
 中村孝幸, 小野正順 (1990): 波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 534-538.  
 中村孝幸, 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.  
 橋本典明 (1992): 海洋波の方向スペクトルの推定方法に関する研究, 港湾技研資料, No. 72, 118 p.  
 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.