

テーパー型潜堤を用いた沿岸流制御の試み

武若 聡*・入江 功**・辻 利徳***

1. 緒 言

海岸の侵食・堆積が生じ、汀線形状が変化する原因の一つに沿岸漂砂量の不均一性が挙げられる。沿岸漂砂は沿岸流によって運ばれることから、沿岸流を制御できれば、汀線形状の維持を意図した沿岸漂砂量制御が実現されると期待される。沿岸流の主たる発生原因は、波が海浜に対して斜め入射することであり、波の入射角を制御できれば、沿岸流を制御し得ると考えられる。本研究では、砕波帯外に波向き制御機能を有するテーパー型潜堤(武若ら, 1994)を設置し、波の入射角を制御して沿岸流を制御することの可能性について、水理実験および数値解析を通じて検討する。

テーパー型潜堤の特徴はその非対称な平面形状にあり、これが波向き制御機能を有することを、武若ら(1994)が確認している。図-1に示すように、潜堤の一边が傾いていることにより、潜堤上を通過した波の波向きが偏向される。これにより、波の汀線に対する入射角が直角に近づき、その効果が沿岸流の変化となって現れる。

従来の潜堤は砕波帯の先端あるいは内部に設置し、潜堤上で波を強制的に砕波させることを意図している。しかしながら、潜堤背後の平均水位の上昇、潜堤側方の沖向き流れ、潜堤直背後の海浜の欠壊等が生じることを懸念する指摘もある(例えば、信岡ら, 1993)。これら为了避免するために、本研究ではテーパー型潜堤を砕波帯外に設置し、主に潜堤の波向き制御機能を利用することとする。

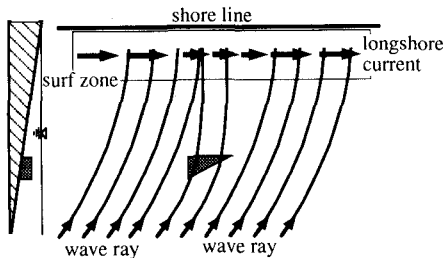


図-1 テーパー型潜堤による沿岸流制御

本研究と類似の発想のもとに、後野ら(1990)は砕波帯内に設置した潜堤を用いて、入射波の波向き、および沿岸流を制御することを実験的に試みている。しかしながら、解析の対象が砕波帯内の複雑な場であったこともあり、制御効果に関する明解な結論は得られていない。

2. 水理実験

(1) モデル地形と実験方法

本研究で対象とするモデル地形を図-2に示す。平面水槽(幅9m, 長さ約18m)の終端に、勾配1/16.2の木製斜面を斜めに設置した。一様水深部の水深を $h_0=0.14$ mに設定し、規則波(周期 $T=0.76$ s, 一様水深部波高 $H_0=0.015$ m)を入射させた。波は汀線に斜め入射し、潜堤を設置しない場合(自然状態)には、汀線に沿って一様な沿岸流が発達する。テーパー型潜堤(幅1.8m, 高さ0.07m)は図中に示す位置に設置した。図中の数字1~16は沿岸方向の位置を示す番号であり、これ以降に示す図面間の比較を容易にするために記した。実験では目視による波浪場の観察、染料を用いた可視化およびトレーサー追跡による海浜流パターンの把握を行った。トレーサーにはフィルムケースのキャップ(直径約30mm)を用い、これの軌跡を水槽の上方からビデオ撮影した。

(2) 実験結果

a) 潜堤無設置(自然状態) 潜堤を設置しない自然状態では、入射波は斜面上で徐々に屈折し、同時に波高

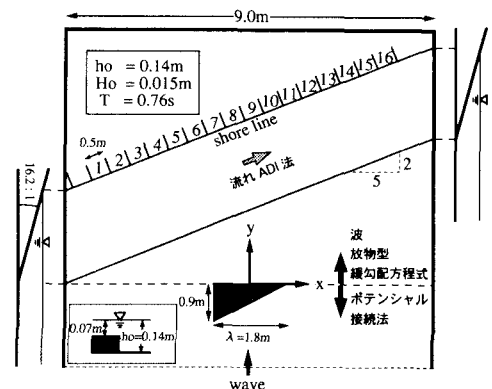


図-2 モデル地形とテーパー型潜堤の設置状況

* 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 工修 (株)大林組

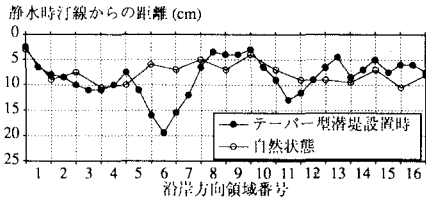


図-3 砕波点位置の沿岸方向の分布

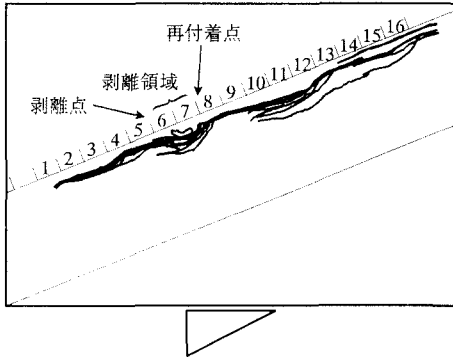


図-4 トレーサーの軌跡 (テーパー型潜堤設置時)

を増大させ、ある水深で一斉に砕波する。砕波点を結んだ線は汀線にほぼ平行になり、沿岸流はこの線に沿って流れた。砕波点位置の実測結果を図示したものが図-3である。トレーサーは沿岸流の上流側から投入した。録画した軌跡をモニター画面に映して読み取ったところ、トレーサーの軌跡は汀線とほぼ平行になった。波の入射、砕波状況および沿岸流の流況から判断して、水槽の中央部では、沿岸方向にほぼ一様な現象が生じていたと考えられる。細砂を沿岸流中に上流側から供給したところ、その全てが下流側に掃流された。

b) テーパー型潜堤(武若ら, 1994) テーパー型潜堤を図-2に示した位置に設置して実験を行った。潜堤上での砕波は生じなかった。波の汀線に対する入射角を目測により測定した。潜堤背後の左側の領域(図-2中、 $x < 0, y > 0$)には波向きが制御された波が発生し、これの汀線への入射角は自然状態に比較して直角に近づいた。潜堤背後の右側の領域($x > 0, y > 0$)には非制御成分の波が発生する。その結果、一部の領域では汀線に対する波の入射状況が、自然状態に比較してより斜めとなった。潜堤背後の波高分布は、テーパー型潜堤を通過する波の屈折および回折・散乱により複雑な様相を呈する。波高の沿岸方向の分布は不均一になり、これにより、砕波点は波高の大きくなる領域で沖側に、小さくなる領域で岸側に移動し、砕波線は沿岸に沿って蛇行した。砕波点位置の実測結果を図-3に示す。

トレーサーの流跡を読み取った結果を図-4に示す。

沿岸流は砕波線に沿って流れ、図中の領域6~8および10~12の区間の沿岸流は剥離していた。剥離領域内には、砕波帯幅とほぼ同規模の循環セルが発生していた。セル内の沿岸流速は自然状態に比較して小さく、汀線近傍の流向は逆転していた。剥離領域の下流側に位置する再付着点近傍の沿岸および岸沖方向の流速は非常に小さくなっていた。以上に観察された流況は、透過性突堤の周辺に形成される流れのパターンに類似している。細砂を上流側から供給したところ、かなりの割合の砂が剥離領域内に捕捉され、また、再付着点の近傍に静的に堆積した。

3. 数値解析

(1) 波と流れ場の計算方法

a) 波の場の計算 本研究で対象とする波浪場は、入射波のテーパー型潜堤上での屈折および回折・散乱、海浜上での浅水変形・砕波を含む複雑なものである。現在のところ、上記の波の変形を包括的に扱える波浪場の計算方法は確立されていない。例えば、水深が徐々に変化することを仮定して導出されたエネルギー平衡方程式、緩勾配方程式等の方程式(例えば、堀川, 1985)は潜堤上の波の変形を十分な精度で記述できない。

そこで、本研究ではポテンシャル接続法(吉田, 1992)を用いてテーパー型潜堤周辺の波浪場の計算を行い、これを放物型緩勾配方程式の入射波条件として与え、海浜上の浅水・砕波変形等を計算した。ポテンシャル接続法では無限に広い領域に置かれた潜堤周辺波浪場の正確な線形解が得られる。ここでは、ポテンシャル接続法により得られたテーパー型潜堤背後の解を、図-2に示す $y = 0$ の位置で放物型緩勾配方程式の初期値として与えた。ポテンシャル接続法で得られる解には、進行波成分と減衰散乱波成分が含まれており、放物型緩勾配方程式を用いて後者の成分を計算することは、原理的に不可能である。今後、初期値にこの成分が含まれていることの影響を調べる必要がある。

放物型緩勾配方程式を示す(堀川, 1985)。

$$A_y - ik^2 A + \frac{(k' C C_g)_y}{2k' C C_g} A - \frac{i}{2k' C C_g} (C C_g A_x)_x = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに A は複素振幅、 C は波速、 C_g は群速度、 $i^2 = -1$ 、 (x, y) は図-2に示す水平方向座標であり、これらの添字は偏微分を意味する。波の主進行方向は y 方向である。 k' は砕波減衰効果を考慮した複素波数であり、以下で表される。

$$k^2 = k^2 \left(1 - \left(\frac{C_f}{2n\omega} \right)^2 - i \frac{C_f}{n\omega} \right) \dots\dots\dots (2)$$

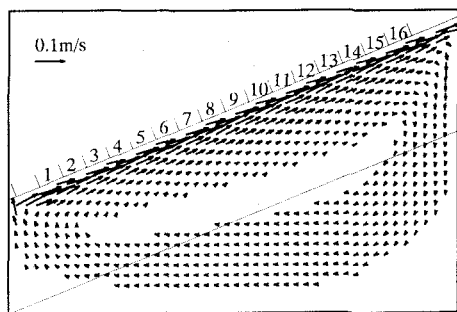


図-5 海浜流ベクトル (自然状態)

$$C_f = \begin{cases} 0; & \text{砕波帯外} \\ 2.5\sqrt{g/h} \tan \mu; & \text{砕波帯内} \end{cases} \quad (3)$$

ここに k は分散関係式 $\omega^2 = gk \tan kh$ を満たす波数, g は重力加速度, C_f は砕波減衰係数, $n = C_g/C$, ω は入射波の角周波数, h は静水深, $\tan \mu$ は斜面勾配である。砕波帯外では $k = k$ となるのに対して, 砕波帯内で k は複素数となり, 波の進行と砕波に伴うエネルギー減衰を併せて表現する。

式(1)は沖側から汀線に向かって, クランク・ニコルソン法により数値積分した。この際, 合田の砕波指標(堀川, 1985)により波の砕波, 非砕波を判定した。波浪場の計算終了後に Radiation Stress (Mei, 1989) を求めた。

b) 流れの場の計算(佐藤ら, 1978, 堀川, 1985) 海浜流の基礎方程式は鉛直・時間平均された連続式と運動方程式である。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(h+\eta)u}{\partial x} + \frac{\partial(h+\eta)v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x - M_x + R_x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y - M_y + R_y = 0 \quad (6)$$

ここに η は平均水位, u, v はそれぞれ x, y 方向の鉛直平均海浜流であり, F_x, F_y は底面摩擦項, M_x, M_y は水平混合項, R_x, R_y は Radiation Stress 項である。底面摩擦項の摩擦係数, 水平混合項の運動量拡散係数の定数の設定は佐藤ら(1978)に従って行い, その妥当性は水理実験との比較から確かめる。

方程式系(4), (5), (6)はADI法により計算した。計算の際には, 側方の壁面, $y=0$ の潜堤を設置した線上, 静水深が 0.005 m となる地点で定義した計算上の汀線, の各々を不透過な境界として扱った。計算が定常状態に到達した後に以下で定義される輸送流れ関数 ψ を求めた。

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u(h+\eta); \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v(h+\eta) \quad (7)$$

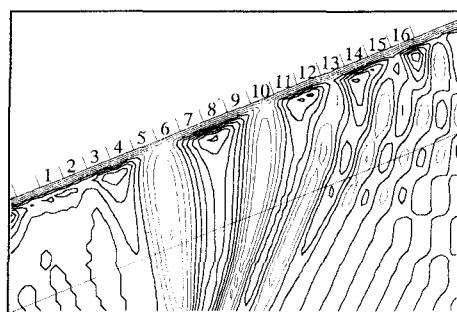


図-6 波高分布 (テーパー型潜堤)
等値線間隔 0.002 m, 細線: 波高 < 0.015 m, 太線: 波高 ≥ 0.015 m

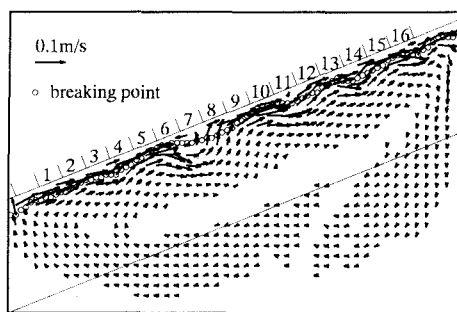


図-7 海浜流ベクトル (テーパー型潜堤)

(2) 計算結果

ここでは, 潜堤無設置状態(自然状態), テーパー型潜堤, ならびにテーパー型潜堤と同体積の矩形型潜堤を設置した場合の計算結果を示す。計算結果を相互に比較し, テーパー型潜堤の波向きと沿岸流制御効果, これが通常の矩形型潜堤を設置するのに比較して優位となる点について検討する。

a) 自然状態 潜堤を設置しない場合には, 入射波は沿岸方向にほぼ一様に屈折し, 砕波点を結んだ線は汀線に平行になる。海浜流は汀線に平行に流れる(図-5)。砕波点の位置, 砕波帯内の沿岸流速の大きさは実験結果とよく一致した。

b) テーパー型潜堤 テーパー型潜堤背後の波高分布(図-6)は複雑な様相を呈する。潜堤の背後には波高が大きくなる舌状の領域が現れ, 沿岸方向の波高分布は不均一になり, 砕波点を結んだ線は沿岸に沿って蛇行する。沿岸流(図-7)はこの線に沿って流れ, 流れの剝離, 再附着が生じ, 剝離領域内に循環セルが形成される。計算された砕波点位置(図中○)の沿岸方向の蛇行状況, 沿岸方向の流速等は実験結果と良く一致し, 流れのパタ

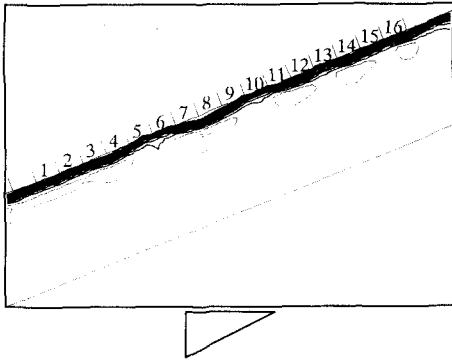


図-8 平均水位分布 (テーパー型潜堤)
等値線間隔 0.5×10^{-3} m, 細線: $\eta < 0$, 太線: $\eta \geq 0$

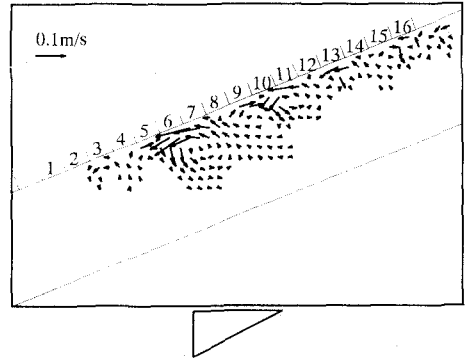


図-10 海浜流の変化 (テーパー型潜堤—自然状態)

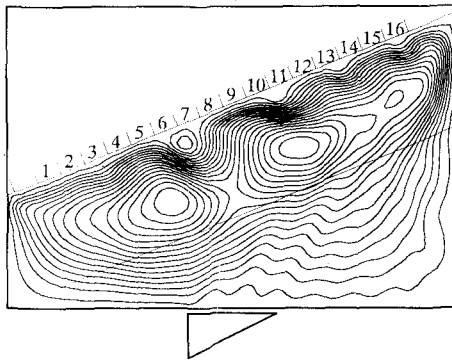


図-9 輸送流れ関数分布 (テーパー型潜堤)
輸送流れ関数間隔 8×10^{-6} m³/s

ーンも循環セルが実験に比べて大きめに計算される点を除いてはほぼ一致した。このことから、計算方法および計算に用いた定数の設定は妥当であったと判断される。

平均水位(図-8)は波高が増大する領域7, 8の碎波帯外で大きく低下し, 剥離した沿岸流はこの領域を迂回するように流れる。汀線近傍の平均水位の上昇量(wave set-up)は, 最大となる地点で自然状態時の約1割増となったが, 概してはほぼ同じ程度の上昇量であった。

輸送流れ関数(図-9)の分布図には, 水槽内に生じる大規模循環流と沿岸域に生じる循環セルが示されている。本図に実験で得られたトレーサの軌跡(図-4)を重ね合わせたところ, 両者は比較的良好に一致した。

図-10には, 海浜流がテーパー型潜堤を設置したことにより変化した状況を, 自然状態時の海浜流速度分布との差分の形で示した。図中の流速ベクトルは, テーパー型潜堤を設置したときの流速分布から自然状態の流速分布を差し引いたものである。図中で沿岸方向の流速ベクトルが x の負の方向を向いているときには, その地点での沿岸流速がテーパー型潜堤を設置したことにより低減していることを示す。また, 沖向き流速ベクトルがみ

られる地点では流れが沖向きに変化したことを意味する。テーパー型潜堤を設置することにより, 多くの領域の沿岸流速が低減することが示されている。

沿岸流の剥離が生じる原因を, 運動方程式(5), (6)のRadiation Stress項 R_x, R_y の空間分布を調べることに探った。沿岸流が剥離する領域6近傍の波高は小さく, ここにはRadiation Stressが殆ど作用していなかった($R_x \approx R_y \approx 0$)。その結果, 流れは平均水位の勾配(=沖向きに作用, wave set-upの効果)とバランスすることになり, 沿岸流の剥離が生じた。

循環セルが形成される剥離領域内の波高は自然状態と比較してやや大きくなるものの, 沿岸流速は低減し, 平均水位の極端な上昇も見られなかった。この領域近傍の沿岸漂砂量の増減は, 波高の増大による砂の巻き上げ量の増加, 沿岸流速の低減による漂砂輸送能の低下, の両効果の兼ね合いにより定まると考えられる。再付着点付近の波高は小さくなり, かつ沿岸流速も極端に低減していた。先の実験で観られたトレーサおよび細砂の運動状況とを併せて考えると, この領域の近傍に砂が堆積することが期待される。

c) 矩形型潜堤 テーパー型潜堤と同体積の矩形型潜堤を図-11に示す位置に設置して計算を行った。波高分布(図-11), 輸送流れ関数分布(図-12)が示すように, 潜堤背後の波高分布が不均一になり, 沿岸流が蛇行することはテーパー型潜堤と共通している。しかしながら, 詳細に計算結果を検討したところ, 次に示す相異点が明らかになった。

波高分布(図-6, 図-11)を比較すると, 矩形型潜堤では潜堤の直背後で波高の増大が見られるのに対し, テーパー型潜堤では波高の増大する領域が左側に寄っていた。これは, テーパー型潜堤による波向き制御効果の一つの現れである。輸送流れ関数分布(図-10, 図-12)を比較すると, 沿岸流内に形成される剥離領域の位置, 流れの蛇行の規模が異なっている。矩形型潜堤背後の沿

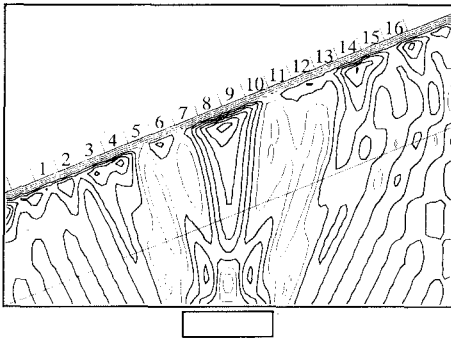


図-11 波高分布 (矩形型潜堤)
等値線間隔 0.002 m, 細線: 波高 < 0.015 m,
太線: 波高 ≥ 0.015 m

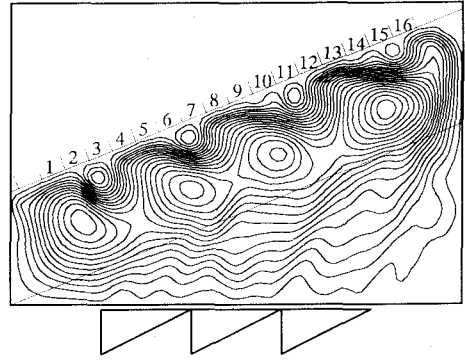


図-13 輸送流れ関数分布 (テーパー型潜堤×3)
輸送流れ関数間隔 $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

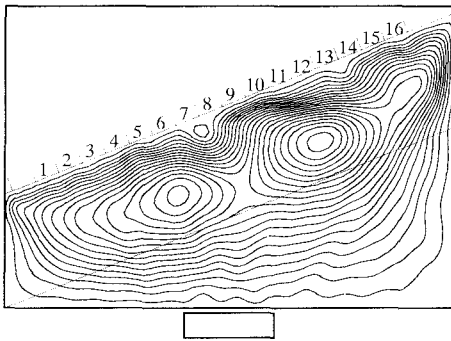


図-12 輸送流れ関数分布 (矩形型潜堤)
輸送流れ関数間隔 $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

岸流の蛇行は小さく、剥離領域の規模も小さかった。これに伴い、沿岸流速が減速される割合もテーパー型潜堤の場合に比較して小さかった。これに関連して、Radiation Stress 項 R_x, R_y の空間分布について比較を行った。その結果、テーパー型潜堤背後の循環セル内 (領域7) では、沿岸流を駆動していた Radiation Stress 成分が、矩形型潜堤背後 (領域8) のそれに比べて小さくなっていった。以上の各点は、テーパー型潜堤により波向きを制御することの有効性を示唆するものである。

4. 結 び

砕波帯外に設置した1基のテーパー型潜堤が海浜流に及ぼす影響を実験と数値解析により調べた。その結果、沿岸流中に透過性突堤を設置したのに類似する流況が造られることを示した。

本研究で設定した状況の下で移動床実験を行えば、沿岸流中の剥離領域周辺に極端なトンボロ地形が発達することが予想され、また、このトンボロの上手および下手側の海浜が欠壊する恐れもある。実際の海の波浪は種々の時間・空間スケールの不規則性かつ多方向性の性質を

有する。より現実の条件に近い入射波を与えた実験あるいは解析を行った場合には、極端なトンボロ地形の発生は抑制されることが考えられる。後者の危惧に対しては、複数のテーパー型潜堤を併用することにより対処できる可能性がある。複数のテーパー型潜堤を設置し、沿岸流中に複数の循環セルとよどみ域を発生させる。これにより、一つのよどみ域を迂回して下手側に流れる沿岸漂砂を、さらに下手側の位置に発生させたよどみ域にて捕捉することを期待する。この考え方の可能性を検討した計算結果を図-13 (輸送流れ関数分布) に示す。3基のテーパー型潜堤を設置した結果、沿岸流中には4つの循環セルとよどみ域が造られる。沿岸漂砂は下手側に輸送される間に、いずれかの循環セルにて捕捉されることが期待される。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, 入江 功, 黒田 寛 (1994): テーパー型潜堤による波向き制御, 海岸工学論文集, 第41巻。
 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。
 信岡尚道, 村上啓介, 入江 功, 松永厚彦, 木原康成, 牛房幸光 (1993): 潜堤構造物の海浜流制御機能と海岸保全機能, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 261-265。
 堀川 清編 (1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582 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。
 Mei, C. C. (1989): The applied dynamics of the ocean surface waves, World Scientific, 740 p.