

面的防護方式における汀線変動特性の検討

加藤 一正*・村上 裕幸**・栗山 善昭***・藤田 誠**

1. はじめに

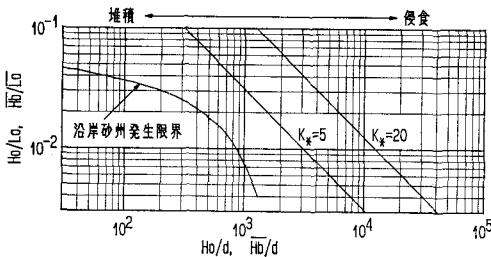
より高質な海岸防護として、沖側に消波構造物を設置し、海岸に砂浜を造成し、そして護岸の天端を低くする面的防護方式が具体化しつつある。この防護方式は、通常時に親水性が高いと同時に荒天時には各施設が組合わさって複合的な防災機能を発揮するものである。各施設のうち、特に親水性・防災機能が求められる砂浜は、外力の変化に応答して常に変形するので、その変動特性を沖合いの消波構造物の水理特性や背後の護岸の安定性との関連において、より定量的に把握しておく必要がある。面的防護方式に求められている機能を考慮すると、荒天時の砂浜変形はもちろんのこと静穏時の変形も検討しておかなければならない。

本研究は、まず従来研究成果をもとに砂浜の安定方策を定量的に調べ、次に砂浜の短期変動特性をより定量的に評価する方法を導き、それらの結果を利用して面的防護方式の砂浜変動特性を考察したものである。

2. 海浜を堆積性にする方策

図一1 に示した岩垣・野田の沿岸砂州発生限界(合田・佐藤, 1981)を利用すると、海浜を堆積性に変える(正常海浜にする、言い換えると、前浜から砂が削り取られない)には、次の3つの方法があることになる。

① 波高 H_0 を小さくする。



図一1 沿岸砂州の発生限界と K_*

- ② 底質粒径 d を粗くする。
- ③ 波長 L_0 (あるいは周期) を長くする。

このうち、何等かの構造物を設置して入射波の周期を制御することは難しいので、波長を長くすることは人為的にはできない。

沿岸砂州の発生限界は、室内二次元水路実験の結果であり、現地への定量的な適用はできない。これに対して、砂村(1985)は現地自然海浜の海浜過程が

$$K_* = \frac{\overline{H_B}^2}{gT^2d} \dots\dots\dots (1)$$

で定義されるパラメータによって説明できることを示した。ここに、 $\overline{H_B}$ は日平均碎波波高、 T は波の日平均周期である。堆積過程は $5 \leq K_* \leq 20$ で生じ、侵食過程は $K_* \geq 20$ で生じる。式(1)は、 $L_0 = gT^2/(2\pi)$ を用いて、次のように変形できる。

$$K_* = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{\overline{H_B}}{L_0} \right) \cdot \left(\frac{\overline{H_B}}{d} \right) \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、右辺は碎波波高と波長の比、碎波波高と底質粒径の比の積になっている。碎波波高と沖波波高の違いがあるものの、沿岸砂州発生限界を説明するパラメータと同義である。そこで、図一1 に、横軸に $\overline{H_B}/d$ を、縦軸に $\overline{H_B}/L_0$ を重ねてとって $K_* = 5, 20$ の関係を示してある。これらの直線は、沿岸砂州発生限界を右方向にシフトさせた位置にあり、したがって砂村のパラメータ K_* からも、海浜を堆積性に変えるには、上記①～③の方法があることが定性的に導ける。なお、同様な指摘は沿岸砂州の発生限界とのもっと厳密な比較のもとに、すでに河田(1988)によってなされている。

一方、樫木(1982)は、Sunamura and Horikawa(1974)の汀線の前進・後退の限界式をもとに、海岸侵食制御の方法を論じている。その結果によると、海浜を堆積性にするためには、上記①～③の方法とともに、海底勾配を急にすることが考えられる。しかし、海底勾配は入射波特性および底質粒径によって左右されるから、これを単独で変化させることはできない。

結局、海浜を岸沖漂砂に対して堆積性にするためには、

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室長
** 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室

- ① 沖に消波構造物を設置して入射波高を小さくする。
 ② 砂浜の底質を大きな粒径に置き換えるか、大きな粒径の底質で養浜する。
 の2つがあり得ることになる。

3. 短期汀線変化モデルの改良

加藤ら(1987)は、日平均エネルギーフラックスの時系列データを外力条件として、毎日の汀線位置を予測する経験的なモデルを示した。このモデルは、

① 急激な汀線後退の生じる判別式

$$y = -16.0 \log \hat{E} + 1.63 \dots \dots \dots (3)$$

② 堆積過程における汀線の前進

$$V_{ad} = 0.68 \text{ (m/day)} \dots \dots \dots (4)$$

の2つで構成されている。ここに、 y は平均汀線位置を原点に沖向き正にとった汀線位置である。 E は、エネルギーフラックスを期間中の平均値 (2.48 tm/ms) で無次元化したエネルギーフラックスである。これらの式は現地データに基づいて経験的に決めたものであるので、本章で使用するために改良を行う。

【急激な汀線後退の生じる判別式】

Sunamura(1984)は、前浜勾配 $\tan \beta_f$ と碎波波高 H_B 、周期 T 、底質粒径 d に関する次式の関係を半経験的に導いた。

$$\tan \beta_f = 0.12 \sqrt{H_B / (g^{1/2} T d^{1/2})} \dots \dots \dots (5)$$

この式に、碎波波高と沖波波高の関係式 (6) Sunamura and Horikawa(1974)と

$$H_B / H_0 = (\tan \beta)^{0.2} (H_0 / L_0)^{-0.25} \dots \dots \dots (6)$$

現地波浪データについて経験的に得られた関係式 (7) (加藤ら, 1987)

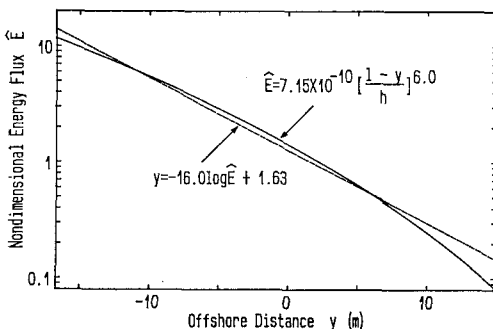
$$H_0 / L_0^{1/3} = 0.25 E^{0.37} \dots \dots \dots (7)$$

を代入して変形すると、

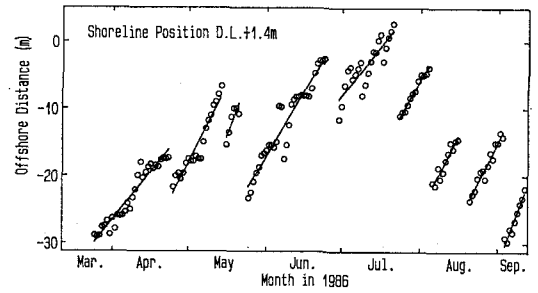
$$E = [0.32 d^{0.25} (\tan \beta)^{-0.1}]^{7.91} (\tan \beta_f)^{-7.91} \quad (8)$$

を得る。ここに、 E は入射波のエネルギーフラックス、 $\tan \beta$ は海底勾配である。さらに、前浜勾配についての次の関係式を導入する。

$$\tan \beta = h / (l - y) \dots \dots \dots (9)$$



図一2 汀線位置とエネルギーフラックスの関係



図一3 堆積過程の汀線前進

ここに、 h と l はそれぞれ 1.12 m, 39.7 m であり、定義は加藤ら(1987)を参照されたい。式 (9) を式 (8) に代入し、波崎海洋研究施設 (以下 HORF と称す) 周辺の海浜条件、 $d = 0.18 \text{ mm}$ 、 $\tan \beta = 1/60$ を考慮すると次式を得る。

$$\hat{E} = \frac{E}{2.48} = 4.19 \times 10^{-10} [(l-y)/h]^{7.19} \dots \dots (10)$$

図一2 は式 (10) の指数部の係数を若干修正して式 (3) と比較したものであり、両者はよく一致する。つまり、経験的に得られていた式 (3) は、砂村の式 (5) によってその妥当性が確認できたことになる。

【堆積過程の汀線前進速度】

図一3 は、HORF で観測された D.L. +1.4 m の汀線位置のうち、堆積過程だけを表示したものである。図中に直線で近似したように汀線位置は堆積期間中はほぼ一定の速度で前進する。しかし、良くみると前進速度は場合によって少し異なる。そこで、各々の汀線前進速度とその期間中の平均エネルギーフラックス E_m の関係について調べる。ただし、図一3 に示した期間だけでは、データ数が少ないので、HORF で日曜、祭日を除き毎日実施している断面測量の結果をもとに、1986年3月12日～1988年12月31日の間に汀線位置が連続して4日以上 (最長37日) 前進する50ケースの前進速度と E_m の関係を調べた。

図一4 は、堆積過程の平均汀線前進速度 V_{ad} と、平均エネルギーフラックスの平方根 $\sqrt{E_m}$ の関係をプロットしたものである。図中の黒丸で示したデータは、図一3 に示したケースである。△印のデータは、他のケースと比較して前進速度が大きい。△印に矢印を付したケースでは、その堆積過程の最終日に汀線付近の平面測量が実施されている。その結果によると、前浜は沿岸方向波長約 240 m のカスプ地形となっており、汀線位置を測定している測線はカスプ地形の凸部に位置していた。このことから、印△のデータについては、前浜の三次元性 (カスプ地形) の影響があるのではないかと推察された。なお、図一4 の下段には、 $\sqrt{E_m}$ を波高に換算する目安として、周期 7.5 s としたときの波高を表示した。

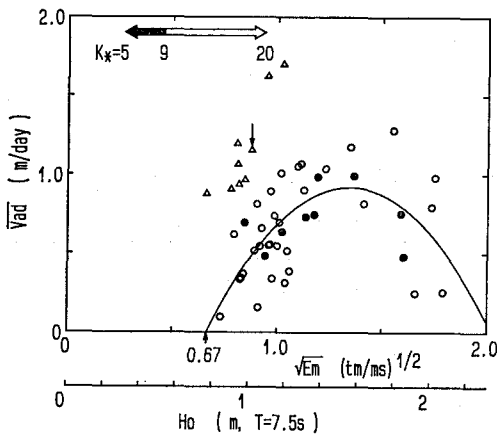


図-4 エネルギーフラックスと汀線前進速度の関係

砂村(1980)は汀線の前進速度と沖波有義波高の間に

$$\bar{V}_{ad} = \alpha (C_0 - \beta H_0) H_0 \quad (11)$$

で示される二次曲線の関係进行想定した。ここに α, β, C_0 は定数である。波のエネルギーフラックスの平方根は H_0 に比例するので、図-4 の $\triangle$ 印以外のデータについて、最小自乗法によって二次曲線近似した結果

$$\begin{aligned} \bar{V}_{ad} &= -1.99 (\sqrt{E_m})^2 + 5.35 \sqrt{E_m} - 2.68 \\ &= 1.99 \{1.36 - (\sqrt{E_m} - \sqrt{E_c})\} (\sqrt{E_m} \\ &\quad - \sqrt{E_c}) \quad (12) \end{aligned}$$

を得た(図-4 中の実線)。ここに、 $\sqrt{E_c} = 0.67$ はそれ以下では汀線位置が変化しない限界エネルギーフラックスである。式(11)には、 $\sqrt{E_c}$ に対応するものがないが、砂村のパラメータ K_* で示される堆積過程 $5 \leq K_* \leq 20$ の下限値がこれに相当するものと考えられる。式(1)を式(6)と式(7)を用いて変形すると、次式を得る。

$$\sqrt{E} = [K_* \cdot \frac{16\pi d}{(\tan \beta)^{0.4}}]^{0.9} \quad (13)$$

式(13)で計算した $5 \leq K_* \leq 20$ の範囲を図-4 上部に示した。また、砂村(1985)によると、 $5 \leq K_* \leq 9$ ではカスプ地形が発達する。これと比較すると今回の汀線前進過程は、高波浪側にシフトしている。

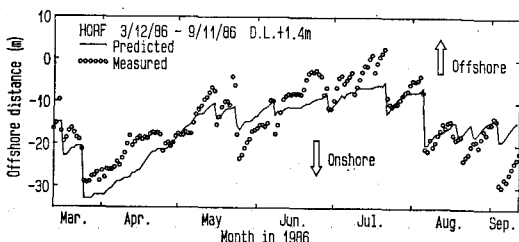


図-5 汀線位置予測結果と実測値の比較

改良した2つの式(式(10)および式(12))を用いて、エネルギーフラックスの時系列データを入力して、汀線位置を加藤ら(1987)と同様に予測してみることにする。ただし、予測計算では、式(10)中の指数係数を若干修正(図-2 参照)、 $l = 36.7 \text{ m}$ とした次式

$$E = 2.48 \times 4.19 \times 10^{-10} [(36.7 - y)/1.12]^{6.0} \quad (14)$$

を用いており、また式(12)中の $\sqrt{E_m}$ は一日平均エネルギーフラックス $\sqrt{E}$ に置き換えた。予測結果を実測汀線位置とともに、図-5 に示す。両者にはよい一致がある。

4. 離岸堤、潜堤背後の短期汀線変動

面的防護方式の代表的消波構造物として、離岸堤、潜堤を取り上げ、その背後の汀線变化を式(12)と式(14)を組み合わせて短期汀線変動の予測を行う。ここでの予測計算では、トンボロ等の三次元的な地形は十分発達しているとし、沿岸漂砂に伴う汀線变化は無視する。また底質条件としてはHORF 周辺の海浜を想定する。予測計算の具体的方法については加藤ら(1987)を参照されたい。

最初に、自然状態の汀線位置の変動を予測する。この計算では、図-6 に“Real E.F.”で示す1986年3月12日～1987年3月11日の一年間の実測エネルギーフラックスの時系列データを外力条件とした。ただし、前半(1986年3月12日～9月11日)は鹿島港で観測されたものであり、鹿島港の観測が欠測になる後半(1986年9月12日～1987年3月11日)は阿字ヶ浦での観測データから鹿島港のエネルギーフラックスを推定したものである。また、夏期に波高が小さく冬期に高波浪となる季節的な偏りを意識して時系列の順番を並べ変えたエネルギーフラックス(図中の“Shuffled”)についても計算してみる。

図-7 が自然海浜の予測結果である。実際の時系列を外力条件とした予測結果の前半(9月11日まで)は、図-5 に示したものと同じである。後半についても、10月に高波浪が来襲して大きな汀線後退が生じており、その

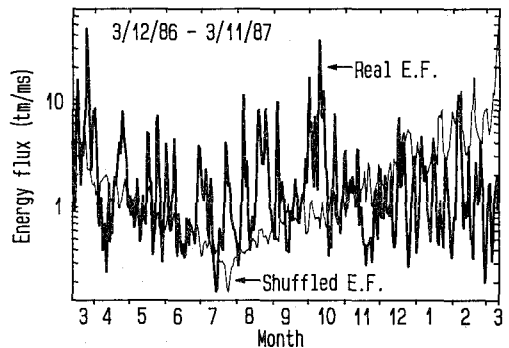


図-6 エネルギーフラックスの時系列

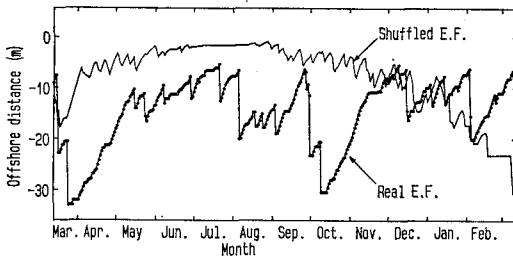


図-7 自然海浜の汀線変動

後汀線が前進するものの何回かの急激な汀線後退が生じている。そして、時系列順序を変えたときの汀線変動は、実際の時系列データを入力したときの汀線変動と非常に異なる。つまり、汀線の短期変動特性は、毎日の波浪がどのような順序で発生するかという特性に大きく依存するといえよう。

エネルギーフラックスの時系列特性に依存して汀線変動特性が異なるので、ここでは図-6の実測エネルギーフラックスの時系列データを外力条件として、離岸堤、潜堤を設置したときの汀線変動特性を調べる。

図-8は、田中(1976)が実験的に求めた離岸堤、潜堤の波高伝達率である。縦軸が伝達率 r であり、横軸は水面を原点に取った天端高($R>0$: 離岸堤, $R<0$: 潜堤)を沖波波高で無次元化したパラメータである。この実験結果によると、離岸堤の場合の伝達率は天端高さに関係なく $r<0.2$ となっている。これに対して、潜堤の伝達率は、無次元天端高、無次元天端幅によって変化する。このようなことから、これらの構造物に対して以下のような波高伝達率を設定した。

離岸堤の伝達率は $r<0.2$ であるが、離岸堤は通常沿岸方向に不連続に設置されることが多く、開口部からは入射波が直接侵入し、また回折の効果もあるので、 $r=0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ について計算を行う。

潜堤の伝達率は、無次元天端高、無次元天端幅によって異なる。ここでは、比較的高い伝達率を与える図中の破線を用いることにする。すなわち、

$$\begin{aligned} r &= 1.0 & R/H_0 < -2.0 \\ r &= 0.4 - 0.3 \times (R/H_0) & R/H_0 > -2.0 \end{aligned} \quad (15)$$

とし、潜堤天端高を $R = -4\text{m}, -3\text{m}, -2\text{m}, -0.5\text{m}$

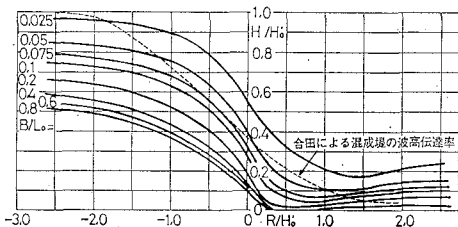


図-8 離岸堤と潜堤の波高伝達率 (田中, 1976)

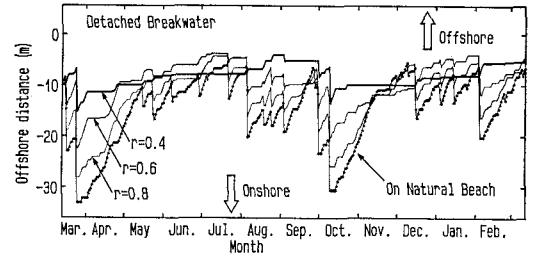


図-9 離岸堤設置後の汀線変動

について計算する。

伝達波高と入射波高の比 $r = H_t/H_0$ で定義されている伝達率を用いて伝達エネルギーフラックスを表現するために、微小振幅波理論から導ける

$$E = 0.08 H_0^2 L_0^{1/2} \quad (16)$$

と式(7)を連立して L_0 を消去すると次式を得る。

$$H_0 = 1.14 E^{0.444} \quad (17)$$

したがって、伝達エネルギーフラックスは次式となる。

$$E_t = r^{2.25} E \quad (18)$$

離岸堤設置の汀線変動予測では、図-6のエネルギーフラックスの時系列データから式(18)で計算される E を外力条件とし、潜堤設置の場合には式(17)で波高を計算した後に R に対して式(15)で伝達率を求め、さらに式(18)で E_t を計算して外力条件とした。

図-9は離岸堤を設置したときの短期汀線変動予測結果である。自然海浜の汀線変動と比較して、伝達率が小さくなるほど、以下のような傾向が認められる。

- ① 汀線位置は全体に沖方向にシフトする。
- ② 急激な汀線後退量が一律に少なくなる。場合によっては汀線が前進する。
- ③ 急激な汀線後退の発生頻度が少なくなる。
- ④ 汀線後退後の汀線前進速度が遅くなる(浜の回復力が弱くなる)。

図-10は、潜堤を設置したときの短期汀線変動予測結果である。潜堤天端水深が浅くなるほど以下のような傾向が認められる。

- ① 汀線位置は全体に沖方向にシフトする。
- ② 急激な汀線後退量が少なくなる。特に自然海浜状態

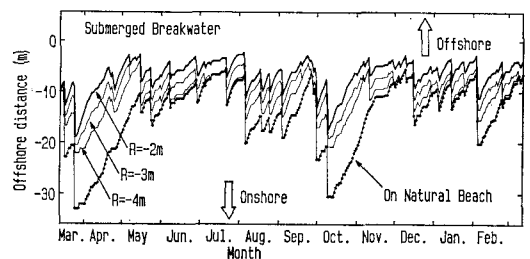


図-10 潜堤設置後の汀線変動

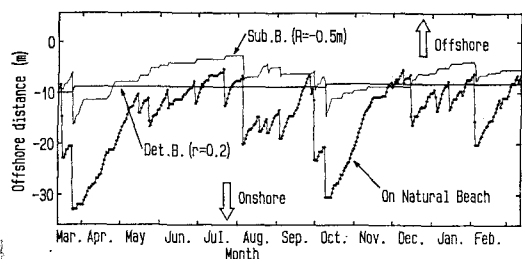


図-11 離岸堤と潜堤設置後の汀線変動の比較

で大きな汀線後退が生じるときほど後退量の少なくなる割合が大きい。

- ③ 急激な汀線後退の発生頻度はほとんど変化しない。
- ④ 汀線後退後の汀線前進速度は自然海浜の場合とほとんど同じである（浜の回復力が維持される）。

このように、離岸堤、潜堤を設置したときの汀線変動特性を比較すると、両者の違いは上記②～③にあることが分かる。この違いは両者の波高伝達特性が異なることによっている。つまり、離岸堤の場合には、入射波高の大小にかかわらず伝達率が一定（図-8 参照）であるので、すべての入射波を同じ割合で減殺してしまう。その結果、浜の回復に必要な波のエネルギーまで減殺し浜の回復力が弱くなる。一方、潜堤の伝達率は R/H_0 に依存しており、入射波高が小さいほど大きくなる。言い換えると、潜堤には low wave pass filter の特性がある。したがって、汀線後退量が大きくなる高波浪を減殺し、浜の回復に必要な波のエネルギーはそのまま通過させる。

図-11は、離岸堤の伝達率を $r=0.2$ としたときと、潜堤の天端高さを $R=-0.5\text{m}$ としたときの短期汀線変動を比較したものである。離岸堤の伝達率が小さいので、汀線位置は非常に安定している。高波浪の来襲する3月と10月にはわずかであるが汀線の前進が生じている。このまま長い年月がたつと、高波浪の度に汀線がわずかつつ前進すると推察される。潜堤を設置したときの汀線の安定性は離岸堤の場合より悪い。しかし、汀線の変動幅は自然海浜に比べて非常に小さい。そして、速い速度で汀線が前進する特徴がある。

さて、面的防護方式において、砂浜背後の護岸まで達する汀線後退が生じると、護岸の安定性の低下が生じさらに背後が被災することにならないとも限らない。そうはならないとしても、護岸からの反射波によって浜が回復しなくなる（榎木, 1982）。したがって、砂浜の防災機能上、高波浪時の最大汀線後退位置が重要になる。このような観点に立つと、天端水深の比較的大きな潜堤でも最大汀線後退量を大きく軽減する（図-10参照）効果があるので、汀線の変動幅より養浜して浜幅が広げれば、景観上優れている潜堤の設置が考え得る。しかし、浜幅が狭く汀線が変動することが許されない状況下では、離

岸堤の設置が必要になる。ただし、離岸堤の場合浜の回復が遅くなる傾向があるので、面的防護方式のもう一つの機能である親水性（浜幅の確保）や景観上は必ずしも十分ではなくなる。

5. おわりに

本論文では、汀線の短期変動モデルを改良し、面的防護方式の代表的消波構造物である離岸堤、潜堤背後の汀線変動特性について検討した。主要な結論は以下の通りである。

- (1) 汀線の急激な後退を判別する式を、砂村の前浜勾配に関する経験式から導いた。
- (2) 堆積過程の汀線前進速度をエネルギーフラックスで評価した。
- (3) 汀線の短期変動特性には、波浪の時系列特性も寄与する。
- (4) 離岸堤は、汀線変動を少なくする効果に優れている反面、汀線後退後の浜の回復に必要な波のエネルギーまで減殺する。
- (5) 潜堤には、波高の大きい波を消波し、小さい波をそのまま通過させる水理特性があるため、最大汀線後退量を小さくしかつ浜の回復力を維持する機能がある。

なお本論文での検討では、離岸堤背後のトンポロ地形の形成に関与する沿岸漂砂量が考慮されていないことや、潜堤背後の水位上昇を無視している等の不十分性がある。また、現時点では汀線の前進速度の評価式中に底質特性が含まれていないので、面的防護方式で底質粒径を粗くした場合の汀線変動特性は検討できていない。これらについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児 (1987): 短期汀線変動のモデル化の試み, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301.
- 河田恵昭 (1988): 海岸侵食制御構造物論, 海岸, No. 28, pp. 1~11.
- 合田良実・佐藤昭二 (1981): 海岸・港湾, 新訂版, わかり易い土木講座, 彰国社, 396 p.
- 砂村継夫 (1980): 自然海浜における汀線位置の時間変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 255~259.
- 砂村継夫 (1985): 海岸地形, 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp. 130~146.
- 榎木 亨 (1982): 漂砂と海岸侵食, 防災シリーズ3, 森北出版, 195 p.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152~157.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 920~938.
- Sunamura, T. (1984): Quantitative predictions of beach-face slope, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 95, pp. 242~245.