

海岸管理のための汀線変動量の確率的評価

鳥居謙一* ・福島雅紀**・佐藤慎司***
高木利光****・Ding Yan*****

1. はじめに

1999年に海岸法が改正され、防護・利用・環境の調和の取れた海岸保全が求められるとともに、消波等の防護上の機能を有する砂浜については、海岸管理者が海岸保全施設として指定することが可能となった。

新海岸法では、海岸保全施設として指定できる砂浜を、「消波等の海岸を防護する機能を維持するために設けたもの」と規定している。「設けたもの」とは、養浜や離岸堤など堆砂効果のある施設の背後の砂浜に限定したものであり、天然の砂浜を指定の対象としていない。また、「防護する機能を維持する」ことを目的としており、利用・環境上の機能のみを維持することを目的とした砂浜の指定は想定されていない。防護上の機能としては、明示されている「消波機能」の他に、「構造物の基礎としての機能」が考えられる。

さらに、一般的に海岸管理者が施設を指定した場合、その施設は一定水準の信頼性を有し、かつ海岸管理者により所要の機能を発揮できる状態に日常的に維持管理されていることが必要となる。例えば、堤防や離岸堤など従来の海岸保全施設は、設計潮位・設計波に対して一定水準の信頼性が確保されている。そして、管理者は高波浪が来襲した直後には施設の変形を確認し、所要の機能が維持されていることを確認している。

海岸管理者が養浜や離岸堤などにより砂浜を設け、かつ堤防の基礎地盤や消波機能を確保するために最低限必要な断面の砂浜であれば、「防護する機能を維持するため」に必要な砂浜であり、法律上の海岸保全施設の要件を満たしている。さらに、海岸管理者が砂浜を海岸保全施設に指定するためには、海岸管理の観点から他の海岸保全施設と同程度の信頼性（確からしさ）が担保されていること、及び指定した砂浜の維持管理法を明確にしておく必要がある。

砂浜は、常時来襲する波浪等によってその形状が変化しており、その形状を一時的な形状で特徴付けるのは困難である。そこで本研究は、砂浜の指定や管理において砂浜の変動特性を考慮するために、汀線位置の確率的な評価を試み、海岸管理の実務の参考とするものである。

2. 砂浜の信頼性評価

信頼性に基づき構造物等を設計する方法の1つとして、耐用期間中の破壊確率を評価する手法がある (ISO, 1996)。この方法では、破壊確率を P_f 、確保されるべき信頼性に対する破壊確率を P_{fs} とすると、

$$P_f < P_{fs}$$

となるように構造物等を設計することが目標となる。限界状態関数を $g(*)$ とすれば、破壊状態は、

$$g(*) < 0$$

で定義され、 $g(*)$ の確率分布: $P[x]$ が与えられれば、破壊確率は、

$$P_f = P[g(*) < 0]$$

となる。

したがって、信頼性を評価するためには、限界状態関数 $g(*)$ とその確率分布 $P[x]$ 及び確保されるべき信頼性の水準 P_{fs} を設定する必要がある。

ここでは、砂浜の信頼性評価にこの概念を適用することを考える。堤防の破壊につながるパターンの1つとして、「堤防の基礎地盤として最低限必要な断面の砂浜が、砂浜の変形により欠損した状態」を定義することができる。ここで、海浜の形状を与える関数を f とすると、関数 f は海象条件(波高, 周期, 波向): S と砂浜の特性(例えば one-line モデルの漂砂量係数や移動層厚): R の関数となり、 $f[S, R]$ となる。さらに、堤防が安定を確保するために必要な断面 M が定義されれば、限界状態関数は、

$$g(S, R) = M - f(S, R)$$

と定義されることになる。

砂浜の断面形状については、縦断地形変化モデルの研究が進んでいるが、前浜の侵食を十分表現できるモデルは構築されておらず(土木学会, 1998)、断面形状を評価対象に用いることは困難であり、平面的な海浜形状を用いた評価が実用的である。このため、海岸管理の実務上

* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室長
** 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所企画課建設専門官
*** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
**** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー 海岸部 技術部長
***** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー 海岸部

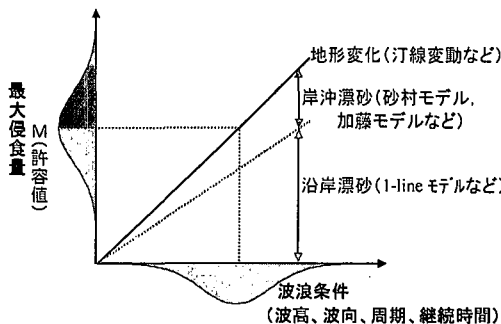


図-1 破壊確率推定法のイメージ

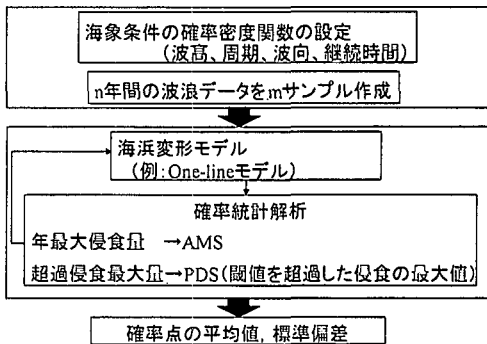


図-2 モデルを用いた推定の手順

の観点も考慮して、破壊の定義を「平均汀線位置からの侵食量が限界値を超過した状態」とし、関数 f は砂浜の汀線の平均位置からの期間中の最大侵食量を与える関数を用いる。また、 M は堤防の安定に必要な砂浜幅が確保される侵食量とする。

次に、限界状態関数 $g(S, R)$ の確率分布 $P(g(S, R))$ について考える。 P_g を年超過確率で表現するとすれば、 $P(g(S, R))$ は年超過確率の確率分布である。また、今回検討の対象とする $g(S, R)$ は、 M が確定値であるから、砂浜の汀線の平均位置からの年最大侵食量の確率分布を推定することになる。

図-1 は、年最大侵食量の確率分布の推定法を示したものである。縦軸の最大侵食量の確率分布を推定する方法としては、実測値から確率分布を直接推定する方法と、 $f(S, R)$ を用いて S, R の確率分布から確率分布を推定する方法がある。また、確率統計処理の方法としては、毎年最大値系列 (AMS) を用いる方法と非毎年最大値 (PDS) を用いる方法がある (賈, 1998; 田中・賈, 1999)。

実測値に基づく推定法については、福島ら (2000) で論じられている。しかし、実際の海岸では汀線変動の詳細な実測データが蓄積されていることは少なく、適用が困難であることが予想される。そこで、ここでは地形データに比べデータの蓄積が進んでいる波浪データを用い、平面的な海浜形状を予測するモデルにより最大侵食量を推定し、確率統計解析により評価する方法を検討する。

平面的な地形変化予測モデルには、one-line モデルなどの沿岸漂砂成分を対象とした海岸線変化モデル、砂村モデル (Sunamura, 1989) や加藤モデル (加藤ら, 1987) などの岸沖漂砂成分を対象としたモデル、および沿岸漂砂成分と岸沖漂砂成分の両方を対象とした3次元海浜変形モデルがある。3次元海浜変形モデルについては、現在のところ複雑な現地の海岸に適用できる段階に至っていない (土木学会, 1998)。ここでは、沿岸漂砂と岸沖漂砂を分けて取り扱うこととする。

岸沖漂砂による汀線変動については、波浪の確率分布

が与えられれば、岸沖漂砂による汀線変動を表現するモデルを用い、汀線変動量の確率分布を表現することが可能となる。具体的には、波浪データから独立な時化を抽出する。例えば、波高 1.0 m 以下の波が 3 日以上継続した場合を独立な時化の区切れ目と考えると、波高の観測データから独立な時化を抽出できる。抽出された時化データに対して汀線位置の予測モデル、例えば砂村モデルを適用することにより、ある時化が生じた時の最大汀線後退量を算出することができる。このように予測された各時化ごとの最大後退量を標本として PDS による確率統計解析を行えば、汀線後退量の確率点を評価することができる。

一方、沿岸漂砂による汀線変動については、汀線変動がある期間中の波浪の時系列に依存しているため、対象期間中の波浪の時系列を設定して、海岸線変化モデルにより汀線変動量を推定する必要がある。そこで、Monte Carlo 法によって波高の時系列データを作成することとした。沿岸漂砂による海浜変形を対象とした解析手順を図-2 に示す。

まず、波浪観測データより波高の確率密度関数を推定し、その確率密度関数に従って n 年間の波浪の時系列を m サンプル作成する。次にサンプルごとに海岸線変化モデルにより汀線位置の時系列を作成し、侵食量の AMS と PDS を抽出する。得られた m サンプルの AMS, PDS に対して確率統計解析を実施し、侵食量の確率点を算出する。この m サンプルの平均値と標準偏差を算定し、確率点を評価する。

3. Monte Carlo 法による汀線変動解析

ここでは、沿岸漂砂の不均衡によって生じる汀線後退量について、図-3 に示す両端に岬あるいは大規模な突堤をもつような延長 1 km の直線海岸を想定し、汀線変化シミュレーションと Monte Carlo 法を組み合わせた手法による解析手順およびその結果を示す。なお、作用

させる波浪条件については、常陸那珂港で観測されたデータより設定した。

Monte Carlo 法で用いる波高の確率密度関数は、通常時の波浪から異常時の波浪までを適切に表現する確率密度関数である必要がある。そこでまず、常陸那珂港で観測された日平均波高 (1980. 1. 1~1996. 3. 31) を片対数紙へプロットし、Weibull 分布への当てはめをおこなった (広瀬・高橋, 1982)。図-4 に示すように、波高 1~2 m 程度の通常時の波浪から波高 4 m 以上の異常時の波浪まで適切に表現されていることが確認されたことから、波高の確率密度関数として Weibull 分布を採用した。なお、周期は常陸那珂港での平均周期から $T=7s$ とし、波向は正規分布で表現できることを確認し、平均波向 0.0° 、標準偏差 $(\sqrt{10})^\circ$ を与えた (図-5)。上記の条件に基づいて、入射波浪の 10 年間の時系列 (日平均波単位) を Monte Carlo 法により 512 サンプル作成した。

次に、作成された 512 サンプルの波浪データを用いて、海浜変形モデル (one-line モデル) により汀線変化を予測した。one-line モデルの適用にあたっては、海底勾配 $1/100$ 、漂砂移動高 $D_c=5.0m$ 、漂砂量係数 $K=0.2$ と仮定した。ここで、漂砂量係数は CERC 式の漂砂量係数である。また、海岸の両端は岬あるいは大規模突堤を想定していることから、沿岸漂砂の両端で出入りはないものとする。計算結果例としてある波浪データサンプルに対する P1, P2 および P3 地点の 10 年間の汀線変化を図-6 に示す。海岸中央の P2 地点の汀線位置はほとんど変動しないのに対し、両端の P1, P3 地点の汀線位置は逆相関の関係で変動している。

次に、各サンプルの予測結果から海岸端部に当たる P3 地点の汀線位置の時系列に注目し、その地点の最大後退量の AMS と PDS を各々抽出した。図-7 はその一例を示す。AMS に関しては、1 サンプルにつき年最大値として 10 個の資料が抽出される。一方 PDS に関しては、平均汀線 (今回の場合は初期汀線と一致) を横切った後の最大後退量を最大値として抽出した。このため、サンプルごとに抽出個数が異なり、100~200 個の資料が抽出された。

512 サンプルから抽出された AMS, PDS に対して、確率統計解析を行い、確率点を求めた。ここでは母集団推定に、AMS については 2 母数のグンベル分布 (Gumbell), 3 母数の一般極値分布 (GEV), PDS については 2 母数の指数分布 (EXP), 3 母数の一般パレート分布 (GP) を確率分布モデル用いた。母数推定は、 L 積率と PWM (probability weighted moments) を用いた (Stedinger ら, 1993; 竹内ら, 1997)。あるサンプルの AMS から確率統計処理により求めた汀線後退量の確率密度関数を図-8 に示す。例えば、EXP では年侵食量の $1/10, 1/20, 1/30$ の各確率点の値は、それぞれ 22.9 m, 26.3 m, 28.3 m となっている。512 サンプルの平均値 (確率点) と 90% 信頼区間を表-1 に整理した。

海岸保全施設としての砂浜が確保すべき信頼性について考える。堤防の基礎としての砂浜は、その断面欠損に

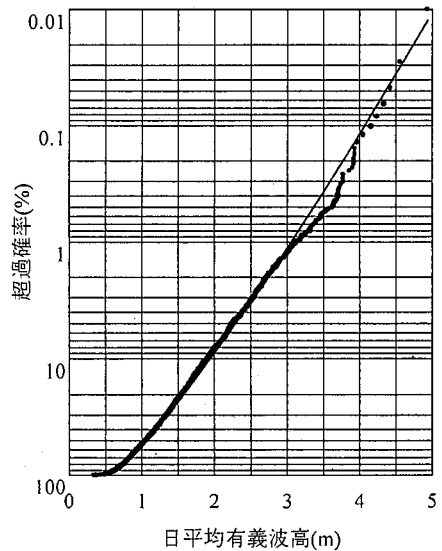


図-4 波高の確率密度分布

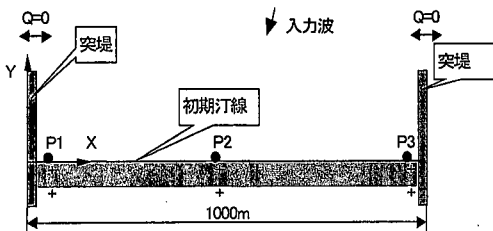


図-3 問題の設定

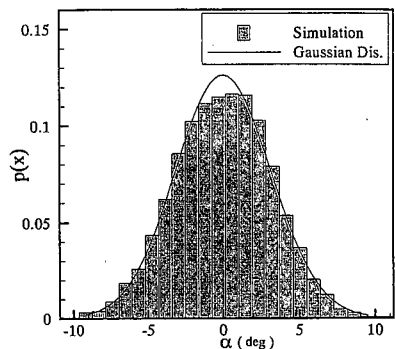


図-5 波向分布

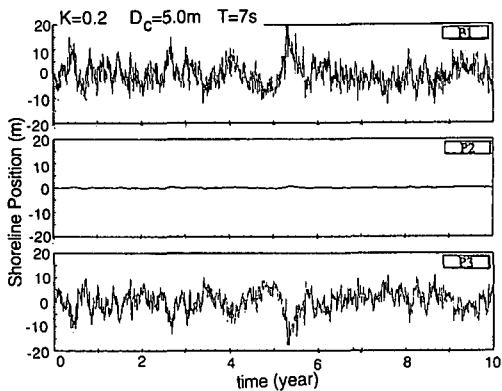


図-6 P1, P2 および P3 地点の汀線変化状況

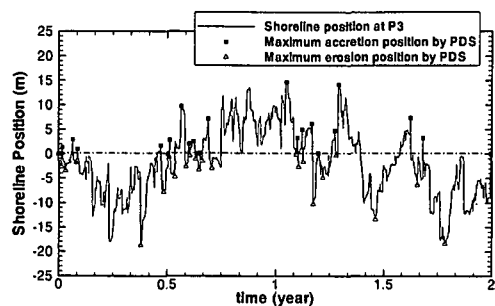


図-7 AMS, PDS 抽出の状況

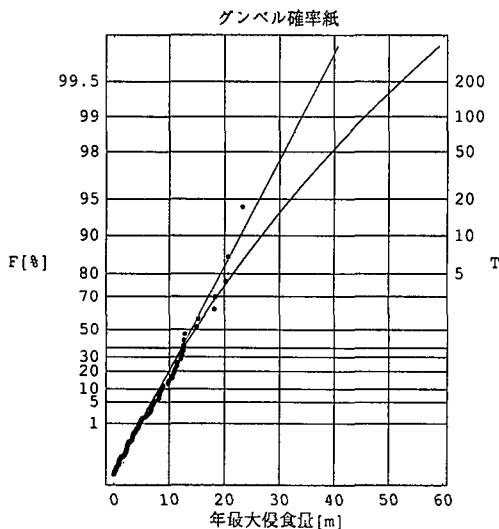


図-8 年最大後退量の確率密度関数

よって直接堤防の倒壊をもたらすため、海岸保全施設としての砂浜が確保すべき信頼性は堤防の信頼性と同等の水準が担保される必要がある。堤防の確保すべき信頼性の規定はないが、海岸保全施設の計画外力の確率規模が1/30~50であることを考慮すれば、堤防の信頼性は少な

表-1 算定された汀線変動量の確率点とその信頼区間

(単位: m)

確率分布モデル	再現期間		
	10年	20年	30年
GEV	19.7	22.3	23.8
	±4.6	±6.7	±8.2
Gumbel	19.9	22.6	24.2
	±4.8	±6.1	±6.7
GP	24.8	30.8	34.6
	±5.4	±8.4	±10.7
EXP	18.9	21.7	23.3
	±2.6	±3.1	±3.3

上段: 確率点

下段: 90%信頼区間

くとも超過確率として1/30以下でなければならない。従って、海岸保全施設に指定された砂浜の信頼性は、断面欠損が生じる確率として1/30以下であることが求められる。今回の解析に結果によれば、再現期間30年に相当する沿岸漂砂量の不均衡による汀線変動量は、最も信頼性の高いEXPの結果を参考にすると、23m程度であることがわかる。

今回は図-3のような極めて単純な条件を想定し解析したものであるが、Monte Carlo法による解析は、さらに複雑な条件においても全く同じ考え方で適用可能であり、従来決定論的に取り扱われてきた海浜変形予測に信頼性の概念を導入する上で有効なツールとなるものと期待される。

4. まとめ

海岸法の改正により砂浜が海岸保全施設に追加され、海岸管理者が指定した砂浜については適正な管理が求められる。砂浜を海岸管理者が海岸保全施設として指定する際には、海岸法の規定を満足するとともに、海岸管理の観点から、指定される砂浜に他の海岸保全施設と同等の信頼性(確からしさ)が担保されてなければならない。従来の海岸保全施設とは異なり、変形することによりその機能を発揮している砂浜においては、変形を考慮した信頼性の照査法が必要となる。

このためにも汀線変動の詳細なデータの蓄積が望まれるところであるが、本研究では実測データの蓄積が進んでいる波浪データに基づくMonte Carlo法により生成された波浪条件、およびone-lineモデルによる汀線変化シミュレーションを用い、両端が突堤に囲まれたモデル海浜の沿岸漂砂による海浜変形を調べた。さらに、突堤脇における汀線位置について、その時系列から抽出され

た AMS, PDS を確率統計処理することによって 30 年確率汀線後退量を算定した。この方法により汀線変動データの蓄積の進んでいない海岸において、汀線位置を確率的に評価することが可能となり、砂浜管理に寄与するものと期待される。

最後に、技術基準の国際標準化、設計の合理化、アカウンタビリティの向上や新技術の円滑な導入を目指して現在各種基準類の性能照査型基準化が指向されている。砂浜に限らず社会資本の信頼性が明確にされることが望まれる。

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.
寶 馨 (1998): 現代水文統計論—水文頻度解析のモデル, 手法とその評価—, 1998 年度 (第 34 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 A コース, 土木学会, pp. A-8-1—A-8-20.
竹内邦良・星 清・江藤剛治・寺川 陽・寶 馨 (1997): 水文

リスク解析, 水文・水資源ハンドブック, 第 7 章, 水文・水資源学会 (編集), 朝倉書店, pp. 228-255.

田中茂信・寶 馨 (1999): 毎年資料と非毎年資料による確率水文学の評価, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 145-150.
土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1998): 漂砂環境の創造に向けて, 第 III 編, 土木学会, 丸善, pp. 171-277.
広瀬宗一・高橋智晴 (1982): 観測結果に基づく沿岸波浪の出現特性, 昭和 57 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1-55.
福島雅紀・鳥居謙一・田中茂信 (2000): 海岸保全施設としての砂浜の確率論的手法による変動量評価, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 701-705.
ISO (1996): ISO/DIS2394: General principle on reliability for structures, ISO, p. 52.
Stedinger, J. R., R. M. Vogel and Efi Foufoula-Georgiou (1993): Frequency analysis of extreme events, Chap 18., Handbook of Hydrology, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, NY, pp. 18.1-18.66.
Sunamura, T. (1989): Sandy Beach Geomorphology Elucidated by Laboratory Modeling, V. C. Lakhan and A. S. Trenhaile (Editors), Applications in Coastal Modeling, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-213.