沿岸災害リスクの評価に基づく 海浜の確率的維持管理手法

伴野 雅之¹・栗山 善昭²・中川 康之³・橋本 典明⁴

¹正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究チーム
(〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Email:banno-m@pari.go.jp

²正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒 239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴フェロー 九州大学大学院教授 工学研究院 (〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

海浜地形の変動、海面水位の変動、遡上高の変動を併せて考慮することで、波の遡上端が防護ラインを超える確率（被災確率）を求め、この被災確率に基づく海浜の維持管理手法を提案した。その適用例として、波崎海岸における現在および将来の地形・水位・波浪データに対して本手法を用い、気候変動に伴う被災確率の変化を比較した。これにより、気候変動に対する海浜の脆弱性を評価でき、適応策の検討に大きく寄与できる。また、既存の地形変化モデルを併せて用い、海浜地形の条件付き確率を求めることで、観測により得られた海浜地形情報をもとに観測後一定期間の被災確率を評価した。これにより、定期点検で得られた海浜地形情報に対して喫緊の対策が必要かどうかの判断ができ、海浜の維持管理面でも有用なツールとして利用することができる。

Key Words : coastal management, stochastic analysis, climate change, beach morphology, wave runup

1. はじめに

海浜は波浪などの外力によって時々刻々変化することから、その変動を考慮した海浜の維持管理手法が求められる。このような変動を有する事象に対しては、過去にどのような頻度でその事象が生じたかを確率的に評価し、管理することが有効である。海浜地形の変動の確率的評価については、福島ら¹⁾や鳥居ら²⁾が阿字ヶ浦海岸で観測された汀線変動データやone-lineモデルによる仮想的な汀線変動のシミュレーションデータに対して極値統計解析を行い、侵食量を確率的に評価しており、海岸管理上、有用な知見が得られている。

一方で、越波等の沿岸災害を考えた場合、海浜地形の変動のみならず、海面水位の変動、波浪の変動に伴う遡上高の変動を併せて考慮する必要がある。つまり、同じ海浜地形においても、その時の海面水位や波浪によって被災確率は異なり、例えば、干潮時よりも満潮時の方が波の遡上はより陸側まで到達し、沿岸災害を引き起こしやすい。特に、将来の気候変動に伴って、海面上昇および波候の変化が予測されており³⁾、海面上昇に伴った遡上域の陸側への移動、波候変化に伴った遡上高の変化、海面上昇や波候変化に伴った海浜地形の変化によって、

沿岸災害リスクは、よりダイナミックに変化すると考えられることから、複数の変動を確率的に併せて沿岸災害リスクを評価することの重要性は今後増していくと考えられる。

そこで本研究では、海浜地形の変動に海面水位の変動および波浪の変動を確率的に併せて考慮することで、沿岸災害リスクを評価した。具体的には、波の遡上端が海浜の防護ラインを超える確率（被災確率）を求め、この被災確率に基づく海浜の維持管理手法を提案した。

一つは、海浜の特性として、その海浜が内包する脆弱性を被災確率によって評価し、それに基づき海浜の維持管理計画の検討、例えば、将来の気候変動に対する適応策の検討などを行う手法である。もう一つは、定期点検において観測された海浜地形情報をもとに、観測後一定期間の被災確率を予測し、それに基づき海浜を維持管理していく手法である。

本研究では、その適用例として、茨城県波崎海岸を対象に被災確率の算定を行った。将来の気候変動に伴った変化によって、どの程度海浜が脆弱化するかを評価することは海岸管理上、重要性が高いことから、本適用例では過去の観測データ（1986年から2007年）と将来の予測データ（2074年から2095年）を用い、それぞれに対し被

災確率を求め、比較することで、波崎海岸の気候変動に対する脆弱性を評価した。また、既存の海浜地形変化モデルを用い、60日間、1年間の海浜地形変化をシミュレーションすることで、海浜地形観測後、一定期間の被災確率を評価した。

2. 被災確率の算定手法

本手法では、海浜地形断面における特定の基準高さ（例えば後述の適用例においては、H.W.L.）のコンター位置（冲向きを正とした岸沖一次元データ）を海浜地形 y として用いる。つまり、この海浜地形 y の変動が海浜の侵食や堆積を代表する。その海浜において防護ライン y_{lim} を超える波の遡上（被災事象 a ）が生じる確率、つまり被災確率 $P(a|y_{lim})$ は式(1)および式(2)により算出する。なお、防護ライン y_{lim} は海浜地形と同じ座標軸における岸沖位置で表されるものである。

$$P(a|y_{lim}) = \int_{-\infty}^{\infty} r(a|y, y_{lim}) f(y) dy \quad (1)$$

$$r(a|y, y_{lim}) = \int_{(y-y_{lim}) \tan \alpha}^{\infty} g(W_R) dW_R \quad (2)$$

ここで、 $r(a|y, y_{lim})$ ：海浜地形 y の条件下において被災が生じる確率（海浜地形が有する潜在的被災確率）、 $f(y)$ ：海浜地形 y の発生確率分布、 $g(W_R)$ ：遡上高 W_R の発生確率分布、 α ：前浜勾配である。遡上高は海面水位（静水面）に静水面からの遡上高を加えた絶対高で表される。以降、単に遡上高と呼んだ場合、絶対高を指す。なお、波浪により求まる遡上高と海浜の地形変化量とは完全に独立ではないと考えられるが、本研究では地形変化量については取り扱わず、地形変化量の積分値である岸沖位置、すなわち、海浜地形の確率分布のみを対象とし、海浜地形と遡上高とは独立であると仮定した。

また、観測された海浜地形 y_0 を与条件とし、観測後一定期間の海浜地形 y の発生確率分布を条件付き確率 $f(y|y_0)$ として用いることで、観測後一定期間における被災確率を条件付き被災確率 $P(a|y_{lim}, y_0)$ として式(3)により算出できる。

$$P(a|y_{lim}, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} r(a|y, y_{lim}) f(y|y_0) dy \quad (3)$$

式(1)における被災確率 $P(a|y_{lim})$ と式(3)における被災確率 $P(a|y_{lim}, y_0)$ は、それぞれ「脆弱性評価用」と「維持管理用」として区別でき、後述の適用例においては、この二つの被災確率を算定した。

3. 適用例における使用データ

(1) 適用対象

本研究では、適用例として波崎海岸における被災確率

図-1 波崎海岸において観測されたH.W.L.の地盤高の岸沖位置の時系列

を算定した。波崎海岸には比較的大きな砂丘が存在する⁴⁾ことから、この砂丘を超えて波が遡上し、波の遡上端が防護ラインを超える確率は非常に小さいと考えられ、適用例として示しにくい。本研究では提案した被災確率の算定手法の適用例を示すために、防護ラインを仮に砂丘よりも前面に設定し、被災確率を求めた。

被災確率の算定には海浜地形の確率分布と遡上高の確率分布 $g(W_R)$ の二つが必要であり、現在および将来の海浜地形データ、海面水位データ、波浪データをもとに各確率分布を求めた。なお、海浜地形の確率分布に関しては、「脆弱性評価用」の被災確率の算定に用いる確率分布 $f(y)$ と「維持管理用」の被災確率の算定に用いる確率分布 $f(y_0)$ の二種類を求めた。以降、これらの海浜地形の確率分布および海浜地形の確率分布を求めるために用いた海浜地形データについても、「脆弱性評価用」、「維持管理用」として呼ぶ。

以降に、波崎海岸における海浜地形および遡上高の確率分布の算定に関する詳細を述べる。また、式(2)により遡上高の確率分布から求まる「海浜地形が有する潜在的被災確率 $r(a|y, y_{lim})$ 」の算定についても述べる。

(2) 海浜地形

a) 海浜地形データ

波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設においては、1986年より長期的かつ高頻度な海浜地形断面が観測されている（例えば、伴野・栗山⁹⁾）。本研究では、海浜地形断面におけるH.W.L.のコンター位置（冲向きを正、波崎海洋研究施設基準座標）を海浜地形 y として用いた（図-1）。

本研究では、「脆弱性評価用」の海浜地形の現在データとして、波崎海岸において1986年から2007年に観測された海浜地形、将来データとして、伴野・栗山⁹⁾で予測された2074-2095年の将来海浜地形を用いた。用いられた将来シナリオは1995年から2095年の海面上昇量が59 cm、将来の平均波高が現在と比較して3%減少、将来の極値波高（超過確率1%）が現在と比較して15%増加するというものである。海浜地形データの時間解像度は、いずれも日単位であり、現在データにおける欠測値は線形補間

した。

また、「維持管理用」の海浜地形データには、仮想波浪パターンに対し、伴野ら⁷⁾の海浜地形変化モデルを用い、60日間および365日間の海浜地形変化をシミュレーションした結果を用いた。与条件となる初期値（海浜地形₀）は、-75 mから50 mまで1 m間隔で与え、それぞれの初期値に対し、海浜地形変化をシミュレーションした。仮想波浪パターンは伴野・栗山⁹⁾で用いた22年間の観測データおよび将来シナリオデータをそれぞれ60日間、365日間ごとに分割して作成した133ケース、22ケースをそれぞれ用いた。

b) 海浜地形の確率分布

上述の「脆弱性評価用」の海浜地形データをもとに、22年間の海浜地形の確率分布を求めた（図-2）。現在の海浜地形の確率分布は岸沖位置0 m付近の発生確率が最も高く、岸沖位置-40 mから50 mの間でばらついていた。一方で、将来の波崎海岸の海浜地形は現在と比較して20 m程度後退し、大きく侵食された状態となることが予測されている。

また、「維持管理用」の海浜地形データをもとに、60日間、365日間の海浜地形の確率分布を与条件ごとに求めた。具体的には、各初期値ごとに、複数の波浪パターンで計算された海浜地形データをアンサンブル平均し、確率分布を求めた。

(3) 遡上高

a) 海面水位および波浪データ

海面水位は対象海岸の北に位置する鹿島港内の検潮所において1時間間隔で観測されている。本データには天文潮による海面水位変動以外にも、低気圧による水位上昇等も含まれており、港内ではあるが、wave setupによる水位上昇も含まれていると考えられる⁹⁾。しかしながら、港内でのwave setupによる水位上昇量は、対象海浜の汀線近傍におけるwave setupによる水位上昇量と比較して小さいと考えられることから、本研究においては海面水位データにはwave setupによる水位上昇量は含まれていないものとして取り扱った。本適用例では、海面水位の現在データとして、1986年から2007年に観測されたものを用い、将来データとして、現在データに対して上述の将来シナリオのトレンドを伴野・栗山⁹⁾の方法に従って加えたものを用いた。なお、潮汐振幅は現在と将来で変化しないと仮定した。

波浪は鹿島港沖の全国港湾波浪観測網（NOWPHAS）の波浪観測地点において2時間毎に有義波高および有義波周期として計測されている。本研究では、波浪の現在データとして、1986年から2007年に観測されたものを用いた。波浪の将来データに関しては、上述の将来シナリオに対応して現在波高を伴野・栗山⁹⁾の方法に従って変

図-2 現在および将来におけるH.W.L.の地盤高位置の確率分布

換したものを用いた。その際、有義波周期は現在と将来で変化しないと仮定した。海面水位および波浪データの時間解像度は、いずれについても2時間単位であり、海面水位のデータについては、2時間間隔にデータを間引くことで、波浪データの時間間隔に合わせた。

b) 遡上高の算定

本研究では、海面水位（静水面）に静水面からの遡上高を加え、2時間間隔で遡上高の絶対高を算出した。

静水面からの遡上高はSwart⁹⁾に従い、式(4)および式(5)により求めた。

$$\frac{R}{d_{50}} = 7644 - 7706 \exp(A_R) \quad (4)$$

$$A_R = \left(-0.000143 \frac{H_0^{0.488} T^{0.93}}{d_{50}^{0.786}} \right) \quad (5)$$

ここで、 R ：静水面を基準とした波の遡上高(m)、 d_{50} ：底質の中央粒径(mm)、 H_0 ：沖波有義波高(m)、 T ：周期(s)である。式(4)および式(5)は実験により求められたものである。この遡上高にはwave setupによる汀線近傍の水位上昇量が含まれている。なお、本適用例では、中央粒径を0.02 mmで一定であると仮定した。

c) 遡上高の確率分布

上述の遡上高の計算結果から、その確率分布を求めた結果、現在においては、およそH.W.L.+0.6 mの高さまで波が遡上する確率が最も高い（図-3）。なお、L.W.L.はH.W.L.-1.45 m、M.W.L.はH.W.L.-0.6 mであることから、wave setupや波浪の影響によって、潮位よりも高い位置まで波が遡上していることが確認できる。一方で、将来においては、およそH.W.L.+1.1 mの高さまで波が遡上する確率が最も高くなる（図-3）。これは主に海面上昇による影響であると考えられ、波がより陸側まで到達しやすくなることで、被災確率はより高くなると事前に推察される。

(4) 海浜地形が有する潜在的被災確率

前浜勾配 α （本適用例では1/25と仮定）を一定と仮定す

ると、遡上高の確率分布から、式(2)により海浜地形の条件下において被災が生じる確率が各防護ラインごとに求められる(図-4)。つまり、海浜地形の岸沖位置に波の遡上端の変動を確率的に考慮することで、波の遡上端が最終的にどこに位置するかを求め、それが防護ラインを超えるか否かによって、海浜地形が有する潜在的な被災確率を求めた。

4. 沿岸災害リスクの評価例

(1) 脆弱性評価用の被災確率の算定

式(1)に従って、海浜地形が有する潜在的な被災確率に海浜地形の発生確率分布を乗じ、海浜地形の全区間で積分することで、現在および将来の波崎海岸の被災確率を算定した(図-5)。この結果、例えば波崎海岸の防護ラインが-100 mであると仮定すると、現在の波崎海岸における被災確率はほぼ0であるが、将来の気候変動に伴って、波崎海岸の被災確率は年間0.096日、つまり10年間に1日程度の確率で被災するようになると考えられる。なお、波崎海岸の防護ラインと仮定した-100 mの位置は、現在の後浜砂丘付近に該当し、実際の防護ラインはより陸側に位置していると考えられることから、実際の波崎海岸における被災確率は上述した値よりもかなり小さい値であることに注意されたい。

このように、本手法は算定される被災確率をもとに海浜の脆弱性を評価でき、例えば気候変動に対する適応策の検討などに有用なツールとして機能する。

(2) 維持管理用の被災確率の算定

維持管理用の海浜地形の確率分布を用い、観測された海浜地形を条件とした観測後一定期間の被災確率を式(3)により求めた(図-6)。これにより、定期点検において観測された海浜地形情報をもとに、今後2ヶ月間や1年間の被災確率を判断できる。

例えば、現在において、上述同様に波崎海岸の防護ラインを-100 mと仮定し、今観測した海浜地形が-40 mであった場合、今後2ヶ月間の被災確率は0.0000113日(約1/88,600日)、今後1年間の被災確率は0.0000114日と算出される。一方、今観測した海浜地形が-60 mであった場合、今後2ヶ月間の被災確率は0.00220日(約1/454日)、今後1年間の被災確率は0.00224日と算出される。これらの確率が喫緊の対策は必要ないと判断できるものであれば、次の定期点検時においてリスクを再評価するという方針を決定できる。

また、上述の例においては、観測から2ヶ月後以降の被災確率はほとんど上昇しておらず、被災が生じるとすれば今後2ヶ月間に生じる可能性が高いと推測される。これは、今観測した海浜地形がかなり侵食された状態の

図-3 波崎海岸における現在および将来における遡上高の確率分布

図-4 各海浜地形条件に対する被災確率の一例(防護ライン: -30 mの場合)

図-5 現在および将来における各防護ラインに対する被災確率

値であるため、今後、海浜地形が回復していくと海浜地形変化モデルによって推定されたことによるものである。

同様に、将来において観測した海浜地形が-40 mであった場合、今後2ヶ月間の被災確率は0.00123日(約1/813日)、今後1年間の被災確率は0.00133日、観測した海浜地形が-60 mであった場合、今後2ヶ月間の被災確率は0.124日(約1/8日)、今後1年間の被災確率は0.126日と算出される。観測した海浜地形の条件が同じであっても、現在と比較して2オーダー程度被災確率が上昇することが示された。なお、将来における海浜地形が-60 mという条件は、発生確率が年間0.0976日(再現期間約10年)であり、比較的

図-6 観測された地形を与条件とした各防護ラインに対する観測後60日間(a, c)と1年間(b, d)の被災確率(a, b: 現在気候, c, d: 将来気候)

観測され得る条件である。定期点検において観測された海浜地形情報に対して、どのような対策を講じるかを事前に検討する際に、将来の海浜地形の発生確率を併せて用いることで、より効果的な対策を検討しやすくなるだろう。

5. 本手法の応用方法

上述した適用例では、波崎海岸における沿岸災害リスクを求めたが、本手法は波崎海岸のみならず、様々な海浜への適用が可能である。必ずしも波崎海岸のように高頻度に海浜地形等が観測されていない場合においても、海浜地形変化モデルを用い、観測データ間を補間したり、海浜地形等の確率分布の分布型があらかじめ分かっている場合には、限られた観測データから分布型に必要なパラメータのみを推定したりする(例えば、海浜地形の確率分布を正規分布に近似し、平均と分散のみを推定する)ことで、各データの確率分布を求められ、被災確率を算定できる。このことから、本研究で提案した手法は汎用性が高い。

適用例において、波の遡上高やwave setupの算定については、既存の式を用いたが、これらの算定については、適用する海浜の特性に応じて、代替式を利用したり、補正を行ったりすることで、信頼性を目的に応じて向上できる。例えば、式(4)および式(5)において波の遡上高の算出するために、中央粒径を0.02 mmで一定であると仮定したが、粒径の変化によって遡上高が異なり、被災確率も異なることから、波候の変化等により粒径に明らかな時間変化がある場合(例えば、柳嶋¹⁰⁾)には、対応する粒径を用いることで、より高い精度で被災確率を評価す

ることができる。

また、脆弱性評価用の将来の海浜地形データとして伴野・栗山⁹⁾の将来予測結果を利用しているが、他のシナリオや予測モデルにおける結果を用いてリスク評価を行うことも可能であり、将来シナリオの見直しや海浜地形変化予測モデルの高精度化に伴って、被災確率を簡単に再評価できる。維持管理用の海浜地形データの計算においては、仮想波浪パターンを用いたが、仮想波浪パターンは観測データおよび将来シナリオデータをもとにしていることから、ケース数は限られた(60日間の仮想波浪パターン133ケース、365日間の仮想波浪パターン22ケース)。より偏りのない確率分布を作成するために、シミュレーションのケース数を増やしたい場合には、観測もしくは予測された波浪の時系列データの周波数スペクトルにおける各周波数成分の位相を乱数によりばらつかせ、再合成することで、時間的な履歴を有した波浪データを作成し、Monte Carloシミュレーションにより海浜地形を計算できる。また、本適用例では、仮想波浪パターンの季節特性は考慮していないが、海浜地形を観測した季節によって仮想波浪パターンを変えることで、観測した季節を与条件とした海浜地形の確率分布を求められ、より詳細なリスク評価を行うことも可能である。

本研究では、防護ラインを超える波の遡上を被災として定義しており、被災の程度は全く議論されていない。被災事象の定量的な評価を行うためには、越波量等を用いた評価が適切であり、被災の程度を考慮したリスク評価手法の開発が必要である。特に、背後に護岸がある海浜においては、波の遡上端によって被災を評価することは難しく、越波量によって被災を定量的に評価することが望ましい。

6. おわりに

本研究では、海浜地形の変動に海面水位の変動および波浪の変動を併せて考慮することで、沿岸災害リスクを確率的に評価し、その沿岸災害リスクに基づく海浜の維持管理手法を提案した。本手法の適用例として、波崎海岸の海浜地形・海面水位・波浪データを対象に、波の遡上端が海浜の防護ラインを超える確率（被災確率）を算出し、維持管理手法としての利用例を示した。

具体的には、波崎海岸における過去の観測データおよび将来の予測データを用い、現在と将来における海浜の被災確率を比較することによって、将来の気候変動に対する海浜の脆弱性を評価し、適応策を検討する手法を示した。また、定期点検において観測された海浜地形情報をもとに、観測後一定期間の被災確率を算定し、喫緊の対策の必要性の有無を判断する海浜の維持管理手法を示した。

このように、本手法は長期的な海浜の維持管理計画の検討や維持管理の実務において有用なツールである。また、本手法は将来の海浜地形データ等を用いることで、気候変動に対する海浜の脆弱性を評価できる。今後、全球の様々な海浜において、将来の気候変動に対する海浜地形変化が予測されるにつれて、様々な海浜における沿岸災害リスクを評価することで、海浜における気候変動の影響評価をより詳細に評価できると期待される。

謝辞：本研究で使用した地形断面データは国立研究開発法人港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研究チーム（旧漂砂研究室）によって観測されたものである。また、波浪データおよび潮位データは国土交通省港湾局により提供されたものである。ここに記し感謝の意を表する。本研究はJSPS科研費 15K06243の助成を受けたものである。また、本研究の一部は文部科学省委託事業気候変動リスク

情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」のもとで行われた。

参考文献

- 1) 福島雅紀・鳥居謙一・田中茂信：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.701-705，2000.
- 2) 鳥居謙一・福島雅紀・佐藤慎司・高木利光・Ding Yan：海岸管理のための汀線変動量の確率的評価，海岸工学論文集，第48巻，pp.1021-1025，2001.
- 3) Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T. and Mase, H.: Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—Future change of waves, sea level and wind, *Ocean Engineering*, Vol. 71, pp.122-129, 2013.
- 4) 柳嶋慎一・中村聡志・伴野雅之：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の遡上と地形および底質粒径の変化—波崎海洋研究施設における現地調査—，港湾空港技術研究所資料，No.1261，54p，2012.
- 5) 伴野雅之・栗山善昭：重回帰モデルによる長期汀線変動に対するバー及び潮位変動の影響評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.67，No.2，pp.501-505，2011.
- 6) 伴野雅之・栗山善昭：潮位による影響及び時間的異質性を考慮した汀線変動モデルの構築と将来予測，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.63-96，2013.
- 7) 伴野雅之・栗山善昭・橋本典明：長期地形観測データに対する非線形混合モデルの適用による平衡断面の不確実性評価，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70，No.2，pp.546-550，2014.
- 8) 柳嶋慎一・加藤一正・磯上和良・村上裕幸：波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査—水位上昇を生じる二次的要因—，海岸工学論文集，第36巻，pp.80-84，1989.
- 9) Swart, D. H.: A schematization of onshore-offshore transport, *Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp.884-900, 1974.
- 10) 柳嶋慎一：台風強化に伴い砂浜海岸で想定される地形変化と底質粒径変化に関する検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.551-555，2013.

(2015.3.18受付)

STOCHASTIC BEACH MANAGEMENT BASED ON RISK ESTIMATION FOR COASTAL DISASTER

Masayuki BANNO, Yoshiaki KURIYAMA,
Yasuyuki NAKAGAWA and Noriaki HASHIMOTO

This study proposed the stochastic beach management method considering the variability of beach morphology, sea level and wave run-up height. The probability of the coastal disaster is calculated for the wave run-up over the coastal defense line and the beach is managed based on the probability. As an example of the application of the method, the vulnerability on the Hasaki coast for the future climate change was estimated by comparing the present and future probability of the coastal disaster. The estimation of the vulnerability is helpful in considering the adaptation plan to climate change. Based on the measured beach condition at present, the probability of the coastal disaster for a certain period on the Hasaki coast was estimated by calculating the conditional probability distribution of the beach topography with the foreshore beach profile change model. The estimation of the probability for a certain period serves a tool for the beach management.