

高知海岸における潮位の確率的評価に関する研究

鳥居 謙一*・人見 寿**・福島 雅紀***

1. はじめに

1999年9月の台風18号は、九州・中国地方に大規模な高潮を発生させ、熊本県不知火町松合地区の死者12名を含む多大な高潮被害をもたらした。この災害を契機に山口県をはじめ東京湾、伊勢湾、大阪湾の設計潮位や超過外力に対するソフト対策についての議論が行われた。

現在の海岸保全施設の設計外力について「改訂海岸保全施設築造基準解説」によれば、波浪は「信頼できる実測値に基づき決定するものとする。」とされ、超過確率1/30~50の確率波が採用されている場合が多い。一方、潮位は、「原則として既往の最高潮位とするか、又は、朔望平均満潮位(以下、H.W.L.)に既往の最大潮位偏差を加えた高さとするものとする。」とされ、確率的評価は導入されていない。

潮位の確率的評価については、観測データの不足等の理由から、確率分布関数の安定性が問題となることが指摘されており(豊島, 1986)、設計に反映されてこなかった1つの原因と考えられる。しかし、その後多くの観測所で観測データが蓄積され、50年程度の観測資料に基づいた評価が可能となりつつある。潮位の確率的評価については、川上・谷本(1965)が潮位偏差の時系列モデルを用い、最大潮位偏差と高潮継続時間の比に応じて最大潮位発生時の天文潮位の確率を求めるとともに、最大潮位発生時の天文潮位の平均値を最大潮位偏差に加えることにより、潮位の発生確率を求める方法を提案している。

今後、信頼性照査に基づく性能設計、アカウンタビリティの向上、事業効果の適切な評価や、ハード対策とソフト対策を組み合わせた防災対策を検討する上で、ハード施設の計画規模の設定など、潮位の確率的評価が不可欠となる。そこで本研究では、観測データの蓄積の進んだ潮位記録を基に、高知海岸における潮位の確率的評価を試みるものである。

2. 潮位の確率的評価

潮位の確率分布の推定は、(1)蓄積の進んでいる50年程度の実測潮位の確率統計解析による方法、および天文潮位と潮位偏差の偶然性を考慮するため、天文潮位と潮位偏差を分離し、(2)天文潮位と潮位偏差の結合確率による方法、(3)Monte Carlo法による方法の3つの方法で評価した。

(1) 実測潮位の確率統計解析による方法

この方法は、実測潮位から毎年最大値系列(AMS)、非毎年最大値系列(PDS)を抽出し、確率統計解析を行い確率分布関数の母数推定を行うものである。母数推定の対象とする確率分布モデルは、極値統計理論に基づくモデルとして、AMSに対して3母数の一般極値分布(以下、GEV)、2母数のGumbel分布(以下、Gumbel)、PDSに対して3母数の一般Parete分布(以下、GP)、2母数の指数分布(以下、Exp)を用いる。AMSについては、前述の分布関数以外に指数分布、平方根指数型最大値分布、対数Pearson III型分布、対数正規分布などについても合わせて検討を行う。母数推定は、積率の新しい概念として導入されるようになってきたL積率法によって行う。

(2) 天文潮位と潮位偏差の結合確率による方法

図-1の概略図を用いて説明する。X軸は天文潮位、Y軸は潮位偏差を示している。潮位は、図中で $\eta_0 = x + y$ の直線で表現される。

いまここで、 x :天文潮位、 y :潮位偏差、 η :潮位、 $p_x(x)$:天文潮位の確率密度関数、 $p_y(y)$:潮位偏差の確率密度関数、 $P_x(y)$:潮位偏差の確率分布関数、 $P_\eta(\eta)$:潮位の確率分布関数とする。

天文潮位は、月の公転及び地球の自転・公転によって生ずる規則的かつ周期的な海面の昇降であり、気象的な要因で起こる潮位偏差とは起こる要因が違うので、両者は相関関係がなく独立である。したがって、任意の点 (x_0, y_0) の確率密度は、両者の積となり $p_x(x_0) * p_y(y_0)$ である。 $x = x_0$ の時 $\eta \geq \eta_0$ となる確率は、

$$P_y(\eta_0 - x_0) = \int_{\eta_0 - x_0}^{\infty} p_y(y) dy \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室長
** 正会員 同 河川研究部海岸研究室研究員
*** 正会員 工博 同 企画部企画課建設専門官

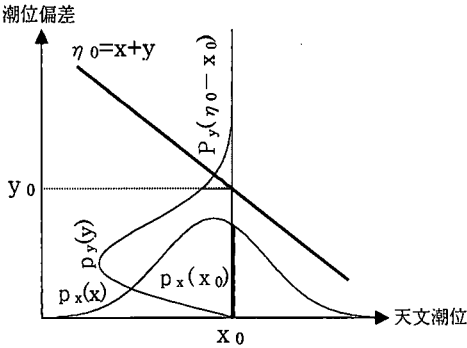


図-1 結合確率概略図

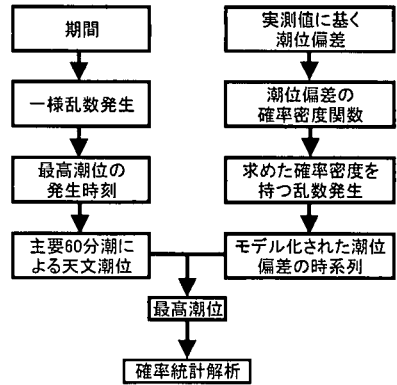


図-2 Monte Carlo 法による評価フロー

であり、任意の x において、 $\eta \geq \eta_0$ となる条件は、この平面上で直線 $\eta_0 = x + y$ の右上の空間の確率の積分値となるので、

$$P_{\eta}(\eta_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\eta_0 - x_0}^{\infty} p_x(x) p_y(y) dy dx \dots\dots\dots (2)$$

を計算することにより算出される。

なお、この方法では最大潮位偏差が発生した時刻の潮位を評価している。しかし、実際には、必ずしも年第1位(年最大潮位偏差)が発生した場合に年最高潮位となっておらず、しかも潮位偏差が最大の時刻で最高潮位となるとは限らない。前者については、評価対象潮位が H.W.L.+ 既往最大潮位偏差の場合には、既往最大潮位偏差規模を上回る潮位偏差が1年に2回以上発生する必要があり、その影響は十分に小さく無視できると考えられる。一方、後者については、天文潮位や潮位偏差の波形によりその影響の度合いが異なり、図-1において積分する空間を拡大することになるため、前述の方法では、潮位の確率を低く評価している可能性がある。

(3) Monte Carlo 法による方法

天文潮位と潮位偏差の時間変動を考慮するため、Monte Carlo 法により確率分布を推定する方法を図-2に評価フローを示し手順を説明する。

- ①十分長い期間を設定し、一様乱数により毎年の最大潮位偏差発生時刻を抽出する。
- ②潮位偏差の実測データより AMS を抽出し、その確率分布関数を導出する。その確率密度をもつ乱数を発生させ最大潮位偏差を抽出する。
- ③抽出された時刻と最大潮位偏差をもとに、主要60分潮により推定された天文潮位の時間変動と、モデル化された潮位偏差の時間変動により最大潮位を算定する。
- ④算定された毎年最大潮位から評価対象潮位付近の前後20点を抽出し、Gumbel 確率上で近似直線を求め、再現期間を算定する。

3. 高知海岸における高潮の確率的評価

(1) 潮位記録の状況

本研究では、気象庁高知検潮所における1950年1月1日～1999年12月31日のうち欠測であった1980～82年を除く47年間の毎時潮位記録を用いる。実測潮位、天文潮位、潮位偏差の状況は以下の通りである。

a) 実測潮位

高知検潮所の47年間の毎時潮位記録から、AMSと閾値を TP+1.1 m に設定した PDS を抽出し、それらを実測潮位データとして用いた。

連続的に欠測している期間については、天気図により高潮の可能性の有無を確認した上で、補間を行わなかった。また、ピーク付近が欠測している場合には、実測値の最大値を用いることとした。欠測値の処理結果を表-1に示す。この結果、AMSについては47個、PDSについては67個の資料が抽出された。

b) 天文潮位

海上保安庁(1992)発行の日本沿岸潮汐調和定数表より、60分潮をもとに毎時天文潮位を推算し、T.P.に換算して用いた。

c) 潮位偏差

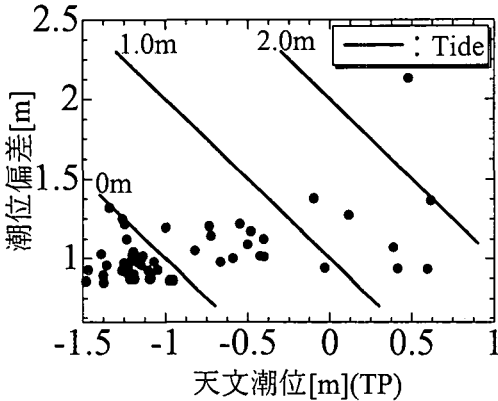
毎時の実測潮位と天文潮位の差を潮位偏差とし、実測潮位と同様にそのデータから AMS 47個と閾値を 0.85 m とした PDS 53個の資料を抽出し、潮位偏差データとした。

d) 天文潮位と潮位偏差の同時生起

図-3は、PDSで抽出された最高潮位時の天文潮位と潮位偏差の関係を示したものである。図中の線は、等潮位線を示している。潮位・潮位偏差ともに最大値は1970年8月21日8時に記録され、潮位 T.P.+2.61 m、潮位偏差 2.13 m である。この時刻の天文潮位は、ほぼそのピークである T.P.+0.5 m であった。統計解析では、任意の

表一 欠測値の処理

年	欠測期間	気象擾乱	対象とした気象擾乱
1967	8/17~ 8/25	T6718 : 980 mb	TS6731 : 992 mb
	9/ 7~ 9/16	T6722 : 960 mb	
	10/25~10/30	T6734 : 970 mb	
1968	7/24~ 7/28	T6804 : 965 mb	TS6804 : 980 mb
1970	8/21~ 8/23	T7010 : 960 mb	—



図一三 PDSで抽出された最高潮位時の天文潮位と潮位偏差の相関

天文潮位において、ランダムに潮位偏差が発生していることが必要であるが、50年程度の観測資料では同時生起の偶然性を評価するためには十分な観測期間とはいえない可能性がある。

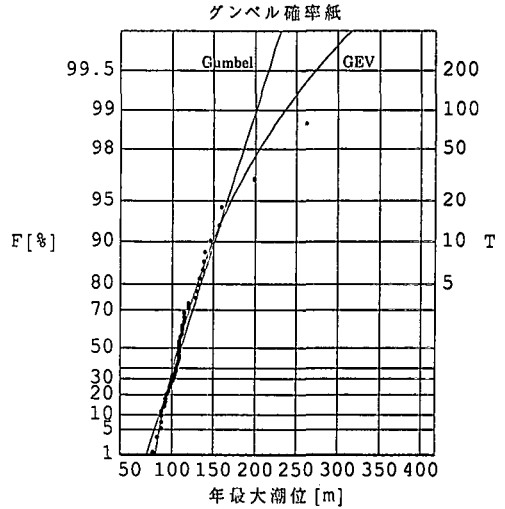
(2) 潮位の確率的評価

高知海岸における高潮の確率分布を前述の3つの方法で推定し、一般的に設計高潮位として採用されることが多いH.W.L.に既往最大潮位偏差を加えた値であるT.P.+2.85mの再現期間を比較した。

a) 実測潮位の確率統計解析による方法

母数推定の結果、実測潮位のAMSに対しては、GEV, Gumbel, PDSに対してGP, Expの適合度が比較的高かった。図一四は、Gumbel確率紙へ実測潮位のAMSをCunnaneのプロットングポジションにしたがってプロットし(黒丸)、推定された確率分布曲線を示したものである。推定された確率分布曲線と1番目および2番目のデータの乖離が大きく、評価対象としている潮位の高い部分での適合性に問題がある。

表一四は、適合度(SLSC)、H.W.L.+期望平均満潮位の再現期間、誤差率(超過確率1/100における推定誤差と確率点の比)を示す。ほぼ適合していると判断される適合度が0.04以下となるのは、AMSのGEVとPDSのGPである。誤差率はPDSのGPよりAMSのGEVの方が小さいので、潮位の確率的評価にAMSのGEVの結果を用いると、H.W.L.+既往最大潮位偏差の再現期間



図一四 実測潮位のAMSに対するGEV, Gumbelの当てはめ

表一四 実測潮位に対する確率分布関数の推定結果

潮位	分布関数	適合度	評価対象再現期間	誤差率
AMS	GEV	0.030	245	±21.4%
	Gumbel	0.085	5250	±11.1%
PDS	GP	0.037	235	±22%
	Exp	0.145	51000	±7.2%

は、245年±71年と評価され、誤差率は29%となった。

しかし、推定された確率分布関数は、大きな誤差を含んでいる。これは、1番目のデータが、既往最大潮位偏差が満潮位付近に発生したものであり、50年程度の観測資料では、天文潮位の偶然性を十分に評価できず、高知海岸の潮位評価としては全体としては過小評価(高い確率)を与えている危険性がある。

b) 天文潮位と潮位偏差の結合確率による方法

まず、潮位偏差の確率分布関数の推定を潮位と同様の手法で行った。表一三に、当てはめを行った確率分布関数の適合度(SLSC)、最大潮位偏差の再現期間、誤差率を示す。潮位偏差については、適合度が0.04以下となるのはAMSのGEVである。潮位偏差の評価に誤差率の小さいAMSのGEVの結果を用いると、既往最大偏差の再現期間は100年±17年と評価される。誤差率17%となっており、潮位の評価よりも若干信頼性が高い。

天文潮位の確率分布については、データ数が十分であることから、算出された天文潮位の毎時データの頻度分布を、そのまま確率分布として扱った。

こうして求められた天文潮位の確率分布と潮位偏差の確率分布関数を用いて、潮位の確率分布の推定を行った。

表-3 潮位偏差に対する確率分布関数の推定結果

潮位	分布関数	適合度	評価対象 再現期間	誤差率
AMS	GEV	0.032	100	±17.1%
	Gumbel	0.044	265	±10.4%
PDS	GP	0.090	1300	±18.5%
	Exp	0.072	605	±7.4%

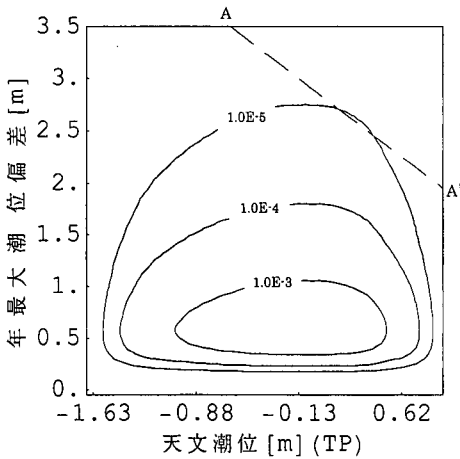


図-5 天文潮位と潮位偏差の結合確率として求められた潮位の確率分布

図-5は結合確率をコンタープロットした結果である。評価対象潮位を超過する確率は、A-A'の右上を積分することにより算出され、再現期間は450年と評価された。天文潮位の確率分布関数は機械的に導出されているためほとんど誤差がないと考えられ、潮位偏差と同程度の安定性を有していると考えられ、前述の方法より若干信頼性の高い結果であると判断される。

この方法では、時間変動が考慮されていないため、過小評価となる恐れがある。しかし、川上・谷本(1965)が大きな潮位偏差が発生する場合、最大潮位偏差と高潮継続時間の比が大きくなるとともに、最大潮位偏差発生時の天文潮位の確率は、ほぼ天文潮位の確率分布と等しくなることを指摘している。このことを参考とすれば、今回の評価対象潮位が大きな潮位偏差が発生した場合を対象としていることから、影響は小さいと推測されるが、その影響を把握する必要がある。

c) Monte Carlo法による方法

天文潮位については、60分潮により推定した。最大潮位偏差については、AMSより推定された確率分布関数を用い、時間変動パターンは、二等辺三角形型とし、高潮の継続時間 (t_m) は12時間について計算を行った。計算期間は、99%の信頼区間±50年以下とするため、500,000年とした。

グンベル確率紙

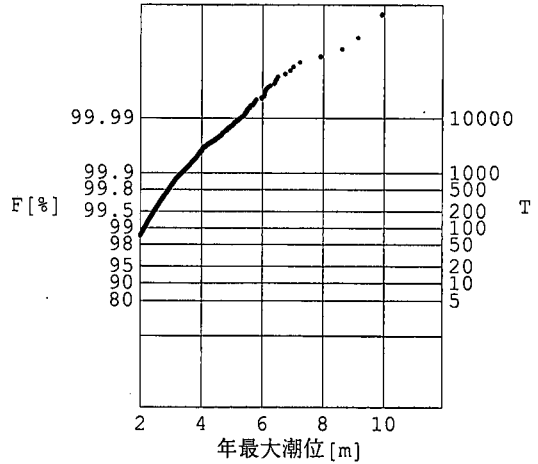


図-6 Monte Carlo法により推測された潮位の分布

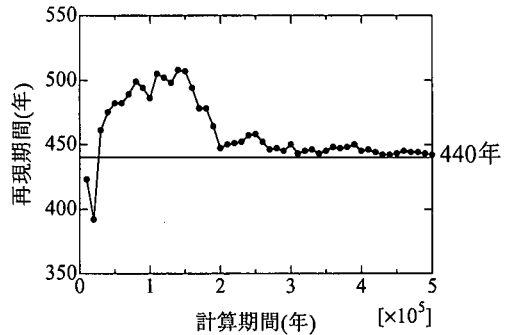


図-7 計算期間が再現期間推定に及ぼす影響

図-6は、潮位2m以上の潮位をGumbel確率紙にプロットしたものである。評価対象潮位以上のサンプルが十分確保されているのが確認される。計算期間による確率的評価の安定性を検討するために、計算期間と評価対象潮位の再現期間の関係を図-7に示す。計算期間が長くなるにともな、評価が安定し約440年程度に漸近していると判断される。潮位偏差の時間変動を考慮したMonte Carlo法により算定された再現期間は、結合確率で推定されたものより10年ほど短くなっているが、Monte Carlo法による評価の信頼区間が±50年程度であることから、両者はほぼ等しい評価となったと判断される。今回の評価対象潮位、高潮継続時間では、川上・谷本(1965)が指摘しているように、潮位偏差の時間変動の影響を受けなかったと考えられる。

4. まとめ

海岸保全施設的设计においては、潮位の安定した母集団推定ができないため、潮位の確率的な評価がなされず、「朔望平均満潮位+最大潮位偏差」を採用する場合は多

かった。しかし、既往最大にもとづく設計では、既往最大を上回る潮位、あるいは潮位偏差が発生することにより、設計潮位を再検討する必要が生じる。さらに、明確な判断基準がないため、極めて稀にしか発生しない潮位を対象に、設計潮位が決定される可能性がある。このことは、長期的な視点で整備が進められる海岸保全施設整備に、多大な手戻りを生じさせる可能性があり、効果的な国土保全に多大な影響を及ぼしかねない。

そこで本研究においては、潮位の確率的な評価法を確立することを目的に、高知海岸の潮位データを統計確率的に分析し、次の結論を得た。

(1) 高知海岸における H.W.L.+既往最大潮位偏差の潮位の再現期間は、実測潮位によれば 245 年、天文潮位と潮位偏差の時間変動を全く考慮しない結合確率によれば 450 年、高潮の継続時間を 12 時間とし潮位偏差の時間変動を考慮した Monte Carlo 法によれば、約 440 年と評価され、概ね 450 年程度であると推定された。

(2) 天文潮位と潮位偏差を独立な現象とし、両者の結合確率として潮位の確率分布関数を導出する方法や Monte Carlo 法による方法では、天文潮位と潮位偏差の同時生起の偶然性を考慮することができる。

今回の結合確率による方法や Monte Carlo 法による方法では、HWL+既往最大潮位偏差以上の潮位を評価の対象とする場合、年 2 位以下の影響は小さいと考えたが、その影響を定量化することが今後の課題である。また、評価対象潮位が低い場合には、川上・谷本 (1965)

のように最大潮位偏差の規模に応じて潮位偏差の時間変動を設定する必要がある。

謝辞：気象庁高知検潮所の潮位記録については、気象庁海洋気象情報室からご提供いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987): 海岸保全施設築造基準, 社団法人全国海岸協会, 269 p.
- 海上保安庁 (1992): 日本沿岸潮汐調和定数表, 海上保安庁, 267 p.
- 川上善久, 谷本勝利 (1965): 異常潮位の発生確率の求め方—天文潮位と気象潮の重ね合わせによる一方法—, 第 12 回海岸工学講演会論文集, pp. 19-25.
- 合田良実 (1997): 設計波高および設計潮位の決め方, 1997 年度 (第 33 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, 土木学会, pp. B-4-1-B-4-18.
- 賀 啓 (1998): 現代水文統計論 一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 浩・江藤剛治・寺川 陽・賀 啓 (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・賀 啓 (1999): 毎年資料と非毎年資料による確率水文量の評価, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 145-150.
- 豊島 修 (1986): 海岸のはなし, 高潮の生起確率—高知高潮の場合—, 社団法人全国海岸協会, pp. 66-68.
- 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.