

防波堤の滑動量に関するMCSに対する波浪の極値分布の 推定精度の設定法に関する考察

A Study on the Setting Method of the Estimation Accuracy of Extreme Distribution of Waves for the Monte Carlo Simulation on the Sliding Displacement Breakwaters

長尾 毅¹・佐貫哲朗²

Takashi NAGAO and Tetsuro SANUKI

The estimation accuracy of extreme distribution of waves is one of the parameters that affects the probability of failure of breakwaters in view of sliding displacement. Previous studies took into consideration of the estimation accuracy of extreme distribution of waves by taking the design deepwater wave height as one of the random variables without directly considering the estimation error of the extreme distribution. The present study discusses the method that takes the parameters on the extreme distribution of waves as one of the random variables for the Monte Carlo simulation. The proposed method evaluates the failure probability with enough confidence level of failure probability in view of practical design.

1. はじめに

防波堤の波浪に対する安全性照査において考慮すべき確率変数の一つとして沖波波高の推定精度が挙げられる。港湾基準における防波堤の波圧作用時の部分係数の設定や、下迫ら（1998）による防波堤の滑動量に関する破壊確率のモンテカルロシミュレーション（以下、MCSと記述）においては、50年再現期間の設計沖波波高の平均値は真値と等しく、変動係数は0.1と設定することでこの点を考慮している。長尾ら（2009）は、統計年数が30年以上であれば極値統計解析により得られた50年確率波高の精度は、真値と推定値の比の値の平均値が1.0、変動係数が0.1程度であることを示しているが、防波堤の滑動量に関する破壊確率には50年確率波高以外の様々な再現期間の波浪が影響を及ぼすため、50年確率波高の精度のみに着目すると正確な破壊確率が評価できない可能性がある。そのため、長尾ら（2010）は、MCSによる破壊確率の信頼度を任意の目標値とするための沖波波高の変動係数の設定方法を提案しているが、この方法は波浪の極値分布には変動を見込まず確定的に扱ったうえで、サンプリングされた沖波波高に変動を見込むという、下迫ら（1998）以来採用されている考え方を踏襲したものである。しかしながら、沖波波高に考慮するばらつきは、本来は波浪の極値統計解析に誤差があるために考慮すべきばらつきであるとも考えることもできる。本研究では、防波堤の滑動量に関するMCSにおいて、推定された波浪の極値分布そのものに確率変動を考慮する方法について

検討することを目的とする。すなわち、極値分布パラメータそのものにばらつきを考慮する。

2. 極値統計解析の精度

長尾ら（2009）は、全国から収集した表-1に示す18ケースのケーソン式防波堤の設計条件における極値分布を

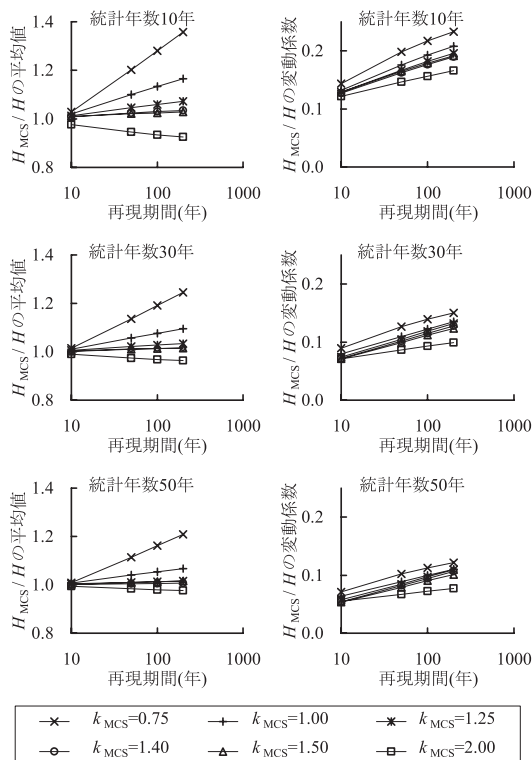


図-1 沖波波高の推定精度

表-1 検討ケース

ケース No.	沖波				堤前波		潮位 (m)	壁前面の 水深 (m)	ケーソン 設置水深 (m)	摩擦係数
	母分布 関数	形状母数 (k)	尺度母数 (A)	位置母数 (B)	有義波高 (m)	有義波周期 (s)				
1	ワイブル	1.40	1.545	5.177	8.99	14.00	0.50	21.00	16.00	0.75
2	ワイブル	1.40	2.168	6.697	11.10	14.10	0.50	21.50	17.00	0.75
3	ワイブル	1.40	2.174	4.865	9.55	14.00	0.50	17.50	13.50	0.75
4	ワイブル	1.40	1.545	5.177	8.99	14.00	0.70	21.00	16.00	0.60
5	ワイブル	1.00	0.994	5.511	8.80	13.00	1.50	22.00	16.50	0.60
6	ワイブル	1.40	2.395	4.154	8.89	13.00	0.40	14.70	12.50	0.60
7	ワイブル	2.00	4.604	1.984	10.37	14.00	1.50	23.20	16.50	0.60
8	ワイブル	1.00	1.187	4.257	7.85	13.00	1.50	12.70	9.50	0.60
9	ワイブル	2.00	4.721	1.355	9.58	12.70	1.30	18.50	13.00	0.75
10	ワイブル	2.00	4.908	0.952	8.72	13.32	0.90	14.50	12.00	0.75
11	ワイブル	2.00	4.908	0.952	9.38	13.32	0.90	17.00	13.00	0.75
12	ワイブル	2.00	3.258	2.357	7.33	11.40	1.60	12.00	9.00	0.60
13	ワイブル	1.00	0.934	1.093	4.33	7.80	2.37	17.20	10.00	0.60
14	ワイブル	1.25	0.875	0.896	3.16	7.00	0.40	6.60	5.00	0.60
15	ワイブル	1.50	1.648	4.837	8.35	12.40	0.40	18.70	13.50	0.60
16	ワイブル	2.00	3.692	1.498	8.45	14.50	1.50	14.10	10.00	0.60
17	ワイブル	2.00	4.505	3.735	10.58	14.30	0.90	18.40	13.00	0.60
18	ワイブル	2.00	4.505	3.735	10.83	14.30	0.90	18.50	12.00	0.75

真の極値分布と仮定し、極値統計解析のMCSにより各々のケースについて10万個の極値分布（以下推定極値分布と記述）を求めることにより沖波波高の推定精度の検討を行っている。本研究においても同様の手法を用いたが、極値統計解析のMCSにおけるあてはめ分布関数は $k=0.75$, 1.0 , 1.25 , 1.4 , 1.5 および 2.0 のワイブル分布のみとした。また、極値分布の推定精度には波浪の統計年数が大きく影響すると考えられるため、極値統計解析のMCSは統計年数10年、30年および50年の3ケースとした。

防波堤の滑動量に関する破壊確率には再現期間が長い非常に大きな波高の出現確率が大きな影響を及ぼすことから、再現期間ごとの沖波波高の推定精度が問題となる。図-1に極値統計解析のMCSにより得られた各統計年数ごとの180万個の推定極値分布を基に算定した推定形状母数(k_{MCS})ごとの沖波の再現期間と推定極値分布と真の極値分布における沖波波高の比(H_{MCS}/H)の平均値および変動係数の相関を示す。再現期間により沖波波高の推定精度は異なり、再現期間が長くなるに従い確率波高の推定精度は低くばらつきが大きくなる。また、統計年数が長く k_{MCS} が大きいほど確率波高の推定精度は高くなる。これらは、 k_{MCS} が必ずしも真の形状母数とはならないためと考えられる。すなわち、形状母数が小さいほど再現期間に対する確率波高の勾配は大きくなる傾向にあり、真値と異なる形状母数が推定された場合の確率波高の差も大きくなるものと考えられる。したがって、防波

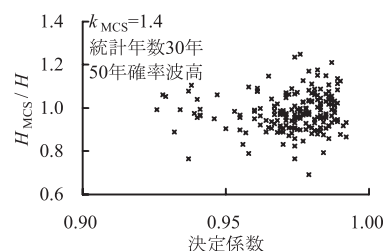
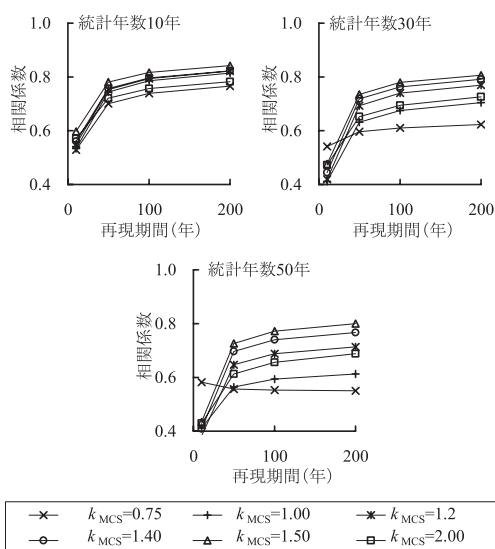


図-2 極値分布の決定係数と沖波波高推定精度の相関

図-3 k_{MCS} と H_{MCS}/H の相関係数

堤の滑動量に関するMCSにおいて沖波波高の変動係数を考慮する場合、全ての再現期間の沖波波高に対して単一の変動係数を用いる従来の方法では正しい破壊確率が得られない可能性があり、また、形状母数ごとに変動係数を設定する必要もあると考えられる。極値分布パラメータにばらつきを考慮する場合にも形状母数のばらつきは重要であると考えられるが、一般的な極値統計解析では形状母数は離散値とされることが多く、また、形状母数を変動させることにより尺度母数 (A) および位置母数 (B) の値にも影響を与え議論が複雑になるため、本研究では、ばらつきを考慮するパラメータは A および B とした。なお、図-2に例を示すように、推定極値分布の決定係数と沖波波高の推定精度には相関が認められないことを確認しており、極値分布パラメータのばらつきの検討には、決定係数の違いは反映させないこととした。

図-3に推定尺度母数 (A_{MCS}) と H_{MCS}/H の相関係数を示す。 $k_{MCS}=0.75$ で統計年数30年および50年の場合を除いては、再現期間50年以上における相関は比較的高い。また、図-4に極値分布の裾長さ (γ_{50}) の推定値と真値の比

($\gamma_{50MCS}/\gamma_{50}$) の平均値および変動係数を示す。 $\gamma_{50MCS}/\gamma_{50}$ のばらつきは比較的小さいことがわかる。50年確率波高と10年確率波高の比で表される裾長さは、合田 (2001, 2002) により提案された極値分布の裾の広がりを出すパラメータであり、極値分布特性を適切に評価する上で重要であることが示されている。これらのことから、尺度母数にばらつきを与えることにより、形状母数は確定値としても極値分布のばらつきは概ね再現できるものと考えられる。ワイブル分布以外の分布関数や形状母数のばらつきの考慮に関しては今後の課題とする。

3. 極値分布パラメータの分布と相関

図-5に統計年数30年の場合の、真の尺度母数と推定尺度母数の比の値 ($\alpha = A/A_{MCS}$) および、推定位置母数と真の位置母数の差を推定尺度母数で除し1を加えた値 ($\beta = (B_{MCS} - B)/A_{MCS} + 1$) の分布の例を示す。図中の実線は図中に示した対数平均と対数標準偏差を持つ対数正規分布を仮定した場合である。いずれも対数正規分布に近い分布であり、統計年数が長く k_{MCS} が大きいほどばらつきは小さくなり、沖波波高の推定精度と調和的な結果である。

図-6に α と β の相関の例を示す。両者の相関は高く、真値に比べて尺度母数が大きく推定されるほど位置母数

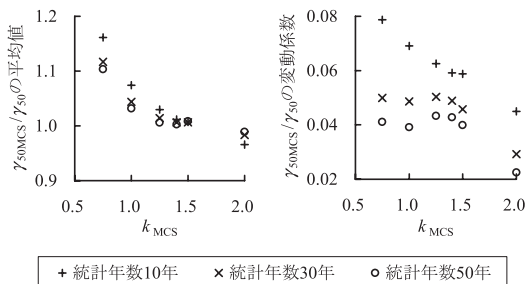


図-4 裾長さの推定精度

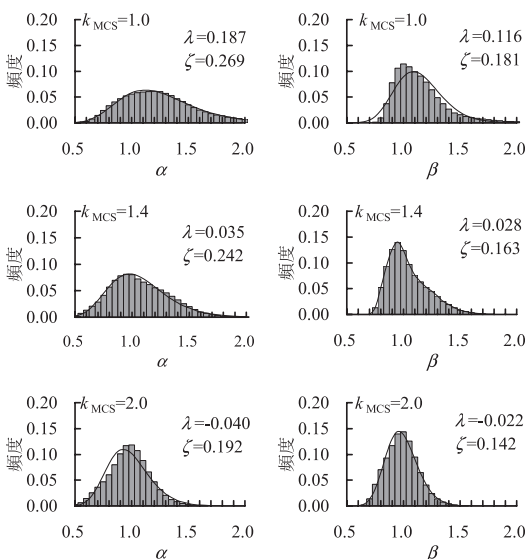


図-5 極値分布パラメータ推定値の分布 (統計年数30年)

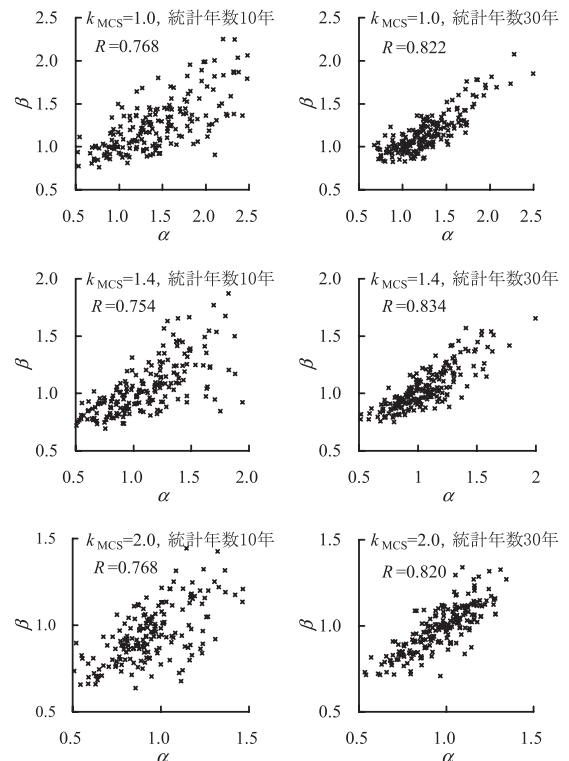


図-6 極値分布パラメータの相関

は小さく推定される結果となった。また、 k_{MCS} が小さく統計年数が長いほど相関は高くなる。

以上の検討から、防波堤の滑動量に関するMCSに用いる極値分布パラメータの推定精度として、 α および β を対数正規分布とみなして算出した、 $\ln(\alpha)$ および $\ln(\beta)$ の平均値、標準偏差および相関係数を表-2および表-3に示す。また、図-7にその一例を示すが、統計年数が長いほど尺度母数および位置母数の推定精度は高く、両者の相関も高いことが確認できる。

4. 極値分布パラメータ推定精度のMCSへの適用

提案した極値分布パラメータの推定精度のMCSへの適用方法を以下に示す。

- (1) 設計条件で与えられた推定極値分布の波浪の統計年数および推定形状母数 k_k に応じて、表-2により設定した平均値および標準偏差を有する正規分布に従い、かつ表-3に示す相関をもつ $\ln(\alpha)$ および $\ln(\beta)$ を乱数によりサンプリングする。
- (2) サンプリングされた $\ln(\alpha)$ および $\ln(\beta)$ から、式(1)および式(2)により尺度母数および位置母数のサンプリング値を求める。

$$A_d = e^{\alpha} \cdot A_k \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$B_d = B_k - A_k(e^{\beta} - 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 A_d ：尺度母数のサンプリング値、 A_k ：推定極値分布の尺度母数、 B_d ：位置母数のサンプリング値、 B_k ：推定極値分布の位置母数である。

- (3) k_k 、 A_d および B_d の各母数を有する極値分布を基に、各年の沖波波高を乱数によりサンプリングする。

次に、上記の方法でMCSを行った場合の破壊確率の信頼度（超過確率）について検討を行う。

表-1の18ケースから条件の偏りの無いよう抽出した9ケースについて表-1に示す極値分布を真の極値分布と仮

定し、沖波波高の変動係数が0の条件で耐用年数50年間の累積滑動量が30cmを超過する確率をMCSにより算出し、これを真の破壊確率 P_f とした。次に、同じ9ケースの推定極値分布に対して、表-2および表-3の推定精度を用いたMCSを実施し、その結果を破壊確率推定値 $P_{f,MCS}$ とした。なお、推定極値分布の全てについて破壊確率を評価すると検討ケース数が膨大となるため、50年確率波高および裾長さの分布に偏りが無いよう、50年確率波高の確率分布の累積値が0.05～0.95の0.05刻みの19の各ラ

表-2 $\ln(\alpha)$ と $\ln(\beta)$ の分布

形状母数	$\ln(\alpha)$			$\ln(\beta)$		
	統計年数10年	統計年数30年	統計年数50年	統計年数10年	統計年数30年	統計年数50年
0.75	0.561	0.426	0.393	0.318	0.237	0.223
	0.423	0.278	0.216	0.348	0.209	0.158
1.00	0.323	0.187	0.134	0.207	0.116	0.081
	0.379	0.269	0.223	0.277	0.181	0.144
1.25	0.149	0.063	0.026	0.096	0.043	0.018
	0.359	0.257	0.216	0.250	0.170	0.140
1.40	0.076	0.035	0.017	0.049	0.028	0.015
	0.345	0.242	0.205	0.235	0.163	0.138
1.50	0.054	0.056	0.060	0.036	0.049	0.053
	0.327	0.225	0.195	0.222	0.156	0.138
2.00	-0.027	-0.040	-0.031	-0.011	-0.022	-0.018
	0.317	0.192	0.153	0.226	0.142	0.116

上段：平均値，下段：標準偏差

表-3 $\ln(\alpha)$ と $\ln(\beta)$ の相関係数

形状母数	統計年数10年	統計年数30年	統計年数50年
0.75	0.769	0.776	0.763
1.00	0.747	0.797	0.808
1.25	0.739	0.814	0.834
1.40	0.733	0.819	0.847
1.50	0.725	0.821	0.863
2.00	0.755	0.821	0.846

表-4 $P_{f,MCS}$ の P_f 超過確率

ケースNo.	統計年数10年	統計年数30年	統計年数50年
1	0.860	0.789	0.772
2	0.912	0.895	0.912
5	0.877	0.930	0.965
6	0.877	0.877	0.877
7	0.842	0.754	0.754
8	0.825	0.842	0.860
9	0.877	0.842	0.825
10	0.912	0.877	0.877
14	0.825	0.807	0.825
平均	0.867	0.846	0.852

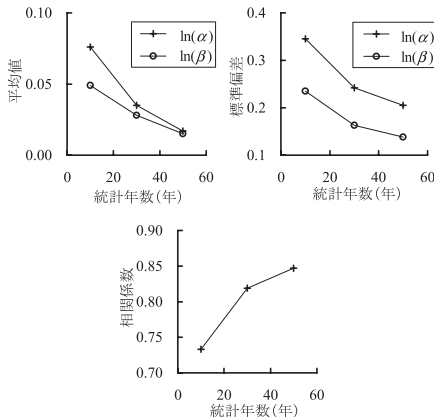
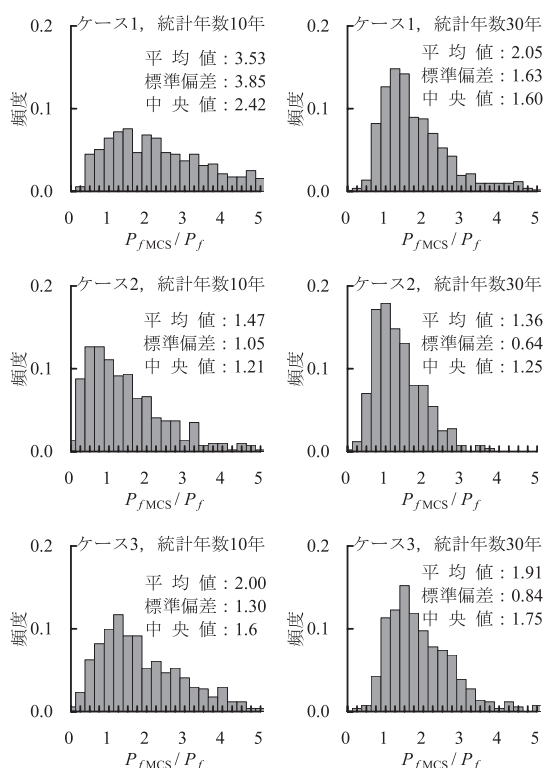


図-7 $\ln(\alpha)$ および $\ln(\beta)$ の分布と相関 ($k_{MCS}=1.40$)

図-8 P_{fMCS}/P_f の分布

ンクについて、裾長さの異なる推定極値分布を57個抽出した。表-4に P_{fMCS} の P_f に対する超過確率を示す。超過確率は0.754～0.965の間にあり、ケースごとに違いはあるが平均的には0.85程度であり、破壊確率の信頼度の観点では概ね良好な結果となった。また、統計年数の違いによる超過確率の差は比較的小さく、波浪の統計年数の長さによらずほぼ同一の信頼性を確保出来るものと考えられる。

図-8は推定極値分布による破壊確率と真の破壊確率の比 (P_{fMCS}/P_f) のヒストグラムであり、表-4に示す9ケース×57推定極値分布を合計したものである。また、ケース1は本研究における極値分布パラメータにばらつきを考慮した場合、ケース2および3は長尾ら (2010) による沖波波高にばらつきを考慮した場合で、沖波波高の変動係数はそれぞれ0.1および0.2である。ケース2および3における P_{fMCS} の P_f に対する超過確率は、統計年数10年で0.587および0.772、統計年数30年で0.665および0.893である。何れのケースにおいても統計年数が長いほど

P_{fMCS}/P_f のばらつきは小さい。ケース1では P_f に比べて非常に大きな P_{fMCS} が算出されるケースがいくつかあるため標準偏差は大きくなっているが、超過確率がほぼ等しいケース3と概ね同様の分布を示している。また、ケース2および3では統計年数の増加に伴い P_{fMCS}/P_f の平均値は小さくなるが中央値は大きくなる。一方、ケース1では平均値と同様に中央値も小さくなっており、ケース2およびケース3に比べて、統計年数が長くなるに従い破壊確率の信頼度が高くなる傾向がより顕著であることを示すものと考えられる。

5. まとめ

本研究による結論は以下の通りである。

- (1) 沖波波高の推定精度は再現期間が長いほどばらつきが大きくなる。また、統計年数が長く形状母数が大きいほど推定精度は高くなる。
- (2) 尺度母数および位置母数の分布は対数正規分布に近く、統計年数が長く形状母数が大きいほどばらつきは小さくなる。また、形状母数が小さく統計年数が長いほど両者の相関は高くなる。
- (3) 防波堤滑動量に関する破壊確率をMCSで評価する場合に用いる極値分布パラメータの推定精度の提案を行い、破壊確率の信頼度の観点で概ね良好な結果となることを確認した。

謝辞：本研究では、前 (独) 港湾空港技術研究所・下迫健一郎氏が作成された防波堤の滑動量に関する破壊確率の算定プログラムを提供頂き、これを改良したものを用いました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 合田良実 (2001)：防波堤の信頼性設計における極値分布の選択とその影響，海洋開発論文集，第17巻，pp. 1-6。
 合田良実 (2002)：設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義，海岸工学論文集，第49巻，pp. 171-175。
 下迫健一郎・高橋重雄 (1998)：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，Vol.37，No.3，pp. 3-30。
 長尾 毅・佐貫哲朗 (2009)：波浪の統計期間と設計沖波波高の推定精度の相関に関する研究，海洋開発論文集，第25巻，pp. 227-232。
 長尾 毅・佐貫哲朗 (2010)：波浪の極値分布の推定精度の影響を考慮した防波堤の滑動量に関するMCSの条件設定法に関する考察，海洋開発論文集，第26巻，pp. 417-422。