防波堤の滑動量に関する破壊確率に対する 波浪の極値分布の推定精度の影響

A Study on the Effect of the Estimation Accuracy of Extreme Distribution of Waves on the Probability of Failure of Breakwaters in view of Sliding Displacement

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. In this study, first, the correlation of probability of failures for precise extreme distributions of waves and those for estimated distributions was discussed by conducting a series of Monte Carlo simulation. Next, the method of setting the coefficient of variation of deepwater wave height accuracy for the Monte Carlo simulation was discussed. The proposed method evaluates the coefficient of variation for the arbitrary target confidence level of failure probability.

1. はじめに

防波堤の波浪に対する信頼性設計において考慮する確 率変数の一つに沖波波高の推定精度があり、沖波の推定 精度として変動係数を0.1と設定することが標準的であ る. 信頼性設計のうち力の釣合に基づく部分係数法の場 合は50年再現期間の最高波高作用時の安定性が問題であ るため、50年確率波高の変動係数の評価のみが問題とな る.しかしながら,滑動量に関する破壊確率をモンテカ ルロシミュレーション(以下, MCSと記述)によって評 価する場合,設計供用期間中に作用する様々な再現期間 の波浪に対する滑動量を評価するために本来は極値分布 について正確な評価が必要である.現実問題としては限 られた波浪データをもとに極値分布を推定しているため 真の極値分布を正確に評価することはできない. このた め沖波の極値分布は正しいと仮定して50年再現期間の沖 波波高の変動係数を0.1としてMCSが実施される場合が 多い(下追・高橋, 1998).本研究では防波堤の滑動量 に関する破壊確率に対する波浪の極値分布の推定精度の 影響を評価することを目的とする.特に,波浪の極値分 布の推定精度は波浪の統計年数に依存すると考えられる ことから,波浪の統計年数に着目した検討を行う.また, MCSにおいて用いる沖波波高の変動係数について、波浪 の統計年数及び破壊確率の超過確率目標値に応じた設定 方法を示した.

2. 沖波の推定精度と再現期間の相関

全国の代表的な波浪18ケースの極値分布をもとに極値 統計解析のMCSを実施し、各々のケースについて波浪の

1	正会員	工博	国土技術政策総合研究所
2	正会員		復建調査設計(株)

統計年数ごとに10万個の極値分布を別途求めており(長 尾・佐貫,2009),本研究ではこの結果を用いた.

始めに,前述の18ケースから条件の偏りの無いよう 表-1に示す9ケースを抽出した.表-1に示すケースNo.は 長尾・佐貫(2009)のケースNo.であり,比較しやすい ようにナンバリングについてはそのままにしている.表-1に示す極値分布を真の極値分布と仮定し,極値統計解 析のMCSにより得られた10万個の極値分布(以下,推 定極値分布と記述)による沖波波高(H_{MCS})と真の極値 分布による沖波波高(H)の比(H_{MCS}/H)を沖波の再現 期間別に求めた.

H_{MCS}/Hの平均値および変動係数と沖波の再現期間の相 関を図-1に示す.平均値,変動係数とも再現期間と正の 相関があり,沖波波高は再現期間が長いほど平均的には 真の波高よりも大きく推定され,ばらつきも大きいこと がわかる.また,統計年数が長くなるに従い平均値は1 に近づき変動係数は小さくなる.

図-2にはケースNo.1における統計年数30年の場合の H_{MCS}/Hの分布の例を示す.図中の曲線は正規分布を仮定

表-1 検討ケース

ケース No.	母分布 関数	形状母数 (k)	尺度母数 (A)	位置母数 (B)
1	ワイブル	1.40	1.545	5.177
2	ワイブル	1.40	2.168	6.697
5	ワイブル	1.00	0.994	5.511
6	ワイブル	1.40	2.395	4.154
7	ワイブル	2.00	4.604	1.984
8	ワイブル	1.00	1.187	4.257
9	ワイブル	2.00	4.721	1.355
10	ワイブル	2.00	4.908	0.952
14	ワイブル	1.25	0.875	0.896



図-2 H_{MCS}/Hの分布 (ケースNo.1, 統計年数30年)

した場合である.中央値は平均値より小さく,再現期間 が長いほど両者の差は大きい.

以上より,沖波波高の推定精度は再現期間により異な ることがわかる.これは,設計供用期間中の様々な再現 期間の波浪を考慮する防波堤の滑動量に関する破壊確率 の評価においては,沖波波高の推定精度として単一の値 を用いると正しい結果が得られない可能性があることを 示唆している.

3. 破壊確率に対する影響

表-1に示した9ケースについて,真の極値分布と統計 年数10年および30年における推定極値分布の各々につ いて防波堤の滑動量に関する破壊確率をMCSによって評 価し,その相関について検討を行った.ここで,極値分 布の違いによる破壊確率の違いを議論するため,MCSに おける沖波波高の変動係数は全ての条件について0と設 定している.

MCSは下迫・高橋(1998)を基本として,長尾ら (2008)に従い,一様乱数の発生にメルセンヌ・ツイス タ(Matsumoto・Nishimura, 1998)を用い,正規乱数へ の変換にボックス・ミュラー法(Box・Muller, 1958) を用いた.試行回数は50万回とした.MCSの結果得ら れる供用期間中の累積滑動量が基準値を超える確率を評 価する(下追・多田, 2003)こととし,基準値は30cm 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, 検討対象とする推 定極値分布は砕波の影響などの観点から偏りなく議論で きるよう各ケースで190個を抽出した.表-2に各ケース における極値分布以外の検討条件とともに破壊確率算定 結果を示す. P_fは真の極値分布による破壊確率であり, P_{fMCS}は推定極値分布による破壊確率である.また, h_b/h は砕波水深と堤前水深の比である.ここで, 砕波水深は

表-2 破壞確率算定結果

ケース No	潮位 (m)	海底 勾配	堤前 水深 (m)	ケーソン 設置水深 (m)	h_b/h	P_f	P_{fMCS}					
							統計年数10年			統計年数30年		
							平均值	変動係数	中央値	平均值	変動係数	中央値
1	0.5	0.008	21.0	16.0	0.996	0.0058	0.0075	0.82	0.0055	0.0064	0.52	0.0057
2	0.5	0.010	21.5	17.0	1.255	0.0127	0.0126	0.59	0.0111	0.0127	0.40	0.0116
5	1.5	0.014	22.0	16.5	0.860	0.0092	0.0117	0.93	0.0077	0.0102	0.58	0.0092
6	0.4	0.023	14.7	12.5	1.405	0.0108	0.0106	0.62	0.0090	0.0105	0.41	0.0095
7	1.5	0.002	23.2	16.5	0.965	0.0028	0.0040	0.79	0.0033	0.0033	0.52	0.0029
8	1.5	0.010	12.7	9.5	1.373	0.0072	0.0074	0.72	0.0064	0.0071	0.44	0.0067
9	1.3	0.010	18.5	13.0	1.215	0.0054	0.0063	0.69	0.0054	0.0058	0.45	0.0054
10	0.9	0.010	14.5	12.0	1.544	0.0181	0.0167	0.58	0.0139	0.0174	0.32	0.0164
14	0.4	0.020	6.6	5.0	1.061	0.0003	0.0004	0.89	0.0003	0.0003	0.64	0.0003



砕波帯内における有義波高最大値の出現水深とした.

P_{fMCS}のばらつきは大きく,変動係数で0.32~0.93の範 囲にあり、平均すると統計年数10年で0.74、統計年数30 年で0.48である.このばらつきは、例えば同じ極値分布 の推定誤差が及ぼす影響として設計沖波波高の変動係数 が統計年数30年の場合に0.1程度である(長尾・佐貫, 2009) ことと比較すると非常に大きなばらつきであると いえる.P_{MCS}の変動係数の大きさはケースごとに異な り、砕波の影響などが破壊確率の算定精度に影響を与え ているものと考えられる.次に、PfMCSの平均値は真の 極値分布による破壊確率(P_t)より大きいケースが多い ことがわかる.これは、図-1に示したように、防波堤の 滑動量への影響が大きい再現期間の長い波が真値に比べ て大きく推定されることによるものと考えられる. ただ し、このことから、極値分布の推定誤差があるために平 均的に安全側の推定をしているとは必ずしもいえないこ とに注意する必要がある.極値分布推定値による破壊確 率 (P_{fMCS}) の分布の例を図-3に示す. この図に示したよ うに、P_{fMCs}の分布は破壊確率の大きい側に裾の長い分 布となっており,図中に実線で示した対数正規分布に近 い分布となっている.従って,表-2に示したように,



 P_{fMCS} の中央値は P_f より小さい事例が多く、事例の平均としては危険側の評価をしているといえる.

図-4にP_{fMCS}とP_fの比の平均値および変動係数と砕波 水深と堤前水深の比(h_b/h)の相関を示す.統計年数が 長いほど平均値は1に近づき,変動係数は小さくなる. また,P_{fMCS}/P_fは平均値,変動係数ともh_b/hと負の相関が あり,砕波の影響が小さいケースでは平均値は1より大 きく,砕波の影響が大きいケースでは1より小さい.こ れは,砕波の影響が大きくなると堤前波高の最大値が砕 波波高に制限されるため,沖波波高の推定値の分布にお いて中央値が平均値に比べて小さいことの影響が大きく なるためと考えられる.

図-5に P_{fMCS} が P_f を超過する確率と h_b/h の相関を示す. 統計年数が長いほど超過確率は大きくなる.また,超過 確率は h_b/h と負の相関があり,砕波の影響が大きいほど 超過確率が小さくなる.この理由は,上述の P_{fMCS} と P_f の比の平均値の砕波による影響と同じであると考えられ る.また,超過確率の平均値は統計年数10年で41%,統 計年数30年で44%であり,統計年数が短い場合には破壊 確率を過小評価する可能性が高い.





図-7 P_{MCS}の分布 (ケースNo.5,統計年数30年)

4. 破壊確率の超過確率

真の極値分布による破壊確率を正確に評価することは 困難であり,設計実務の観点からは破壊確率を安全側に 評価する方法を構築することが重要である.このため, 破壊確率の信頼度(超過確率)を50%以上の任意の値と するためのMCSにおける沖波波高の変動係数の検討を行った.

下迫・高橋(1998)によるMCSでは,波浪の極値分布 の推定誤差による影響を再現期間50年の設計沖波波高を ばらつかせることで考慮しており,本研究においても設 計沖波波高の変動係数を適切に設定することで破壊確率 の超過確率をコントロールする方法を検討する.前章と 同様に表-1に示した9ケースについて,推定極値分布を 用いたMCSを設計沖波波高の変動係数(V_{H0})を下迫・ 高橋(1998)による0.1以外に0.2,0.3,0.4に変化させ て実施し,設計沖波波高の変動係数と破壊確率の超過確 率の相関の検討を行った.なお,検討対象の極値分布推 定値は前述の190個からさらに絞り込み各ケースで27個 とした.ケースの絞り込みにおいては,沖波波高および 極値分布の裾長度(合田,2002)の分布に偏りが無いよ う留意した.

表-3に破壊確率の超過確率の一覧を,図-6に h_b/h の異 なる3ケースにおける破壊確率の超過確率と V_{H0} の相関を 示す. V_{H0} が大きく統計年数が長いほど超過確率は大き く, V_{H0} の標準値である0.1の場合,超過確率の平均値は 統計年数10年で53%,統計年数30年で63%である.また, 統計年数30年の場合には V_{H0} =0.2で概ね80%以上の超過 確率が期待できるが,統計年数10年で砕波の影響が大き い場合には V_{H0} =0.2では60%程度の超過確率しか期待で きないことがわかる.

図-7に破壊確率(P_{fMCS})の分布の例を示す.図中の実 線は対数正規分布を仮定した場合で,破線は設計沖波波 高の変動係数が0の破壊確率の分布に対数正規分布をあ

ケース	h_b/h	統計年数10年					統計年数30年				
No		$V_{H0} = 0.0$	$V_{H0} = 0.1$	$V_{H0} = 0.2$	$V_{H0} = 0.3$	$V_{H0} = 0.4$	$V_{H0} = 0.0$	$V_{H0} = 0.1$	$V_{H0} = 0.2$	$V_{H0} = 0.3$	$V_{H0} = 0.4$
1	0.996	0.460	0.615	0.876	0.991	1.000	0.476	0.724	0.976	1.000	1.000
2	1.255	0.380	0.543	0.815	0.979	0.999	0.421	0.652	0.961	1.000	1.000
5	0.860	0.405	0.571	0.843	0.985	1.000	0.452	0.695	0.967	1.000	1.000
6	1.405	0.368	0.508	0.699	0.887	0.978	0.389	0.584	0.859	0.986	1.000
7	0.965	0.494	0.622	0.790	0.915	0.978	0.524	0.675	0.897	0.986	0.999
8	1.373	0.368	0.517	0.739	0.927	0.992	0.400	0.584	0.893	0.997	1.000
9	1.215	0.442	0.525	0.697	0.863	0.955	0.464	0.604	0.846	0.974	0.998
10	1.544	0.341	0.479	0.623	0.760	0.859	0.394	0.567	0.837	0.975	0.999
14	1.061	0.390	0.677	0.782	0.863	0.914	0.427	0.829	0.926	0.979	0.995

表-3 破壊確率の超過確率



てはめた際の分布である。MCSにおいて沖波波高の変動 係数を設定することで破壊確率は大きくなり、 V_{H0} が大 きくなるに従い P_{fMCS} の平均値および標準偏差は大きく なることがわかる。図-8に V_{H0} と P_{fMCS} の変動係数の相関 の例を示す。前述のように V_{H0} が大きくなると P_{fMCS} の標 準偏差も大きくなるが、変動係数は小さくなっており V_{H0} を変化させて破壊確率の信頼度を確保しても大きな 問題はないものと考えられる。

表-3の結果をもとに、 V_{H0} を目的変数,統計年数,破壊確率の超過確率および h_b/h の3つを説明変数として回帰分析を行い式(1)を得た.

 $V_{H0} = -0.332 - 0.002N + 0.612P_{ff} + 0.096(h_b/h) \cdots (1)$

ここで、N:統計年数(年), P_f:破壊確率の超過確率で ある.破壊確率の超過確率目標値の設定に関しては別途 検討を行う必要があるが,式(1)のP_fに超過確率目標 値を用いることにより,任意の信頼度に対する沖波波高 の変動係数の設定を行うことが出来ると考えられる.近 似式の精度の一例を図-9に示す.図中の実線が近似式に よる計算値である.

5.まとめ

本研究による結論は以下の通りである.

- 沖波波高の推定精度は波浪の統計年数のみならず再現 期間に応じて変化し、その変動係数は再現期間が長い ほど大きくなる.
- 滑動量に関する破壊確率は波浪の統計年数や砕波の影響度と相関がある.
- ③ 滑動量に関する破壊確率をMCSで評価する場合に用いる沖波波高の変動係数を,波浪の統計年数,破壊確率の超過確率目標値および砕波水深と堤前水深の比の関数として表した.

長尾・佐貫(2009)により沖波波高の変動係数は極値 分布の裾長度(合田,2002)と相関が高いことが明らか となっている。今後,極値分布の裾長度等を考慮するこ とにより,沖波波高の変動係数の設定の精度の向上につ いて研究を行う予定である.また,滑動量の限界値が異 なる場合についても併せて研究を行う必要がある.

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(2002):設計波高に係わる極値統計分布の裾長度パラ 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・多田清富(2003):混成堤の性能照査型設計法に おける滑動量の許容値設定に関する検討,海岸工学論文 集,第50巻, pp.766-770.
- 下追健一郎・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・吉岡 健・尾崎竜三 (2008):防波堤の滑動量に関 する破壊確率の算定精度向上に関する研究,海岸工学論 文集,第55巻, pp. 941-945.
- Box, G. E. P. and E. Muller (1958) : A note on the generation of normal deviates, Ann. math. stat., 29, pp. 610-611.
- Matsumoto, M. and T. Nishimura (1998) : Mersenne Twister : A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, Acm transactions on modeling and computer simulations, 8, pp. 3-30.