

確率的台風モデルを用いた信頼性設計法

花山格章*・関本恒浩**・鶴飼亮行*
高木泰士*・畑田佳男***・山口正隆****

近年, 研究が進められている港湾構造物の信頼性設計法では, 波浪の設定精度が結果に大きな影響を与えると指摘されている。そこで, 信頼性設計への来襲波評価法として確率的台風モデルに波浪推算モデルを組み合わせた手法を構築するとともに, ケーソン防波堤の期待滑動量の評価を行った。極値分布から年最大波を推定する従来の手法と比較した本手法の特長として, 年最大波だけでなく極大波を考慮できること, 波浪を経時的に取り扱えること, 来襲波の周期および波向の評価が可能であることが挙げられる。したがって, 本手法を用いることにより, 波高・周期・波向およびそれらの経時変化を考慮した, より合理的な港湾構造物の設計が可能となる。

1. はじめに

近年, 海域施設の合理的な設計という観点から, 構造物の性能とこれに対する照査法を明らかにした性能設計法が指向され, 性能設計法の一つである信頼性設計法の研究が進められている。防波堤の耐波安定性に関する従来の信頼性設計法(たとえば, 下迫・高橋, 1998)では, 波浪条件として観測波高の極値統計解析によって求められた極値分布に従う年最大波 1 波を対象とし, その波が波向も含め一定の継続時間作用することを仮定している。さらに, 沖波波形勾配を一定と仮定しているため, 実質的に来襲波の周期に制限が設けられている。信頼性設計法に関する既往の研究(たとえば, 合田・高木 1999)によれば, 防波堤の耐波安定性に関して波浪の設定精度の影響が大きいことが指摘されており, より合理的な波浪条件の設定が必要と考えられる。

本研究では, 防波堤の信頼性設計における作用波浪評価法として, 山口ら(1994)による確率的台風モデルに波浪推算を組み合わせた手法を用いるとともに, 従来の作用波浪評価法との比較検討を行った。また, 確率的台風モデルを用いることのメリットとして, 年最大波だけでなく対象地点に来襲する高波浪を評価できること, 波浪の作用状況を経時的に扱えること, それと合わせて来襲波の波向の変化を考慮できること, および来襲波の周期も適切に設定できることが挙げられる。

2. 計算手順

本研究における信頼性設計法に対する確率的台風モデルと波浪推算を組み合わせた来襲波算定システム(以下, 確率的台風モデル法と呼ぶ)の手順を述べる。

①確率的台風モデルによる台風のシミュレート

本研究では, 野中ら(2000)による拡張型確率的台風モデルを用いて台風を発生させ, 6 時間ごとの台風属性

資料(台風中心位置, 中心気圧, 台風半径, 楕円長軸傾斜角, 台風半径比)を作成する。この拡張型確率的台風モデルは, 1951~1991 年における 320 台風の台風属性資料についての統計解析を 7 月以前, 8 月, 9 月, 10 月以降の 4 つの季節に分けて行い, 台風の確率的に発生においてその季節的特性を反映させるものである。

気圧分布モデルには, Myers 式を一般化した楕円型気圧分布を用いる。この楕円型気圧分布を使用することにより, 日本付近での台風減衰時の楕円状気圧分布を再現することができる。

②海上風推算

①で作成した 6 時間ごとの台風属性資料を 1 時間ごとに挿入し, 台風モデル法を用いて海上風の推定を行う。台風モデル法は通常, Myers 式で表される円形気圧分布から近似して求められる中心対称傾度風と台風の進行に伴う風を合成し, 海面での摩擦抵抗を考慮して海上風を算出する手法である。ここでは, 円形気圧分布に代わり, 上述した楕円型気圧分布を用いることから, 傾度風の算出は野中ら(2000)の手法にしたがった。また, 10 m 高度海上風への変換係数は, 山口ら(1995)にならい 0.6 を採用した。

③波浪推算の実施による対象地点の有義波高の算出

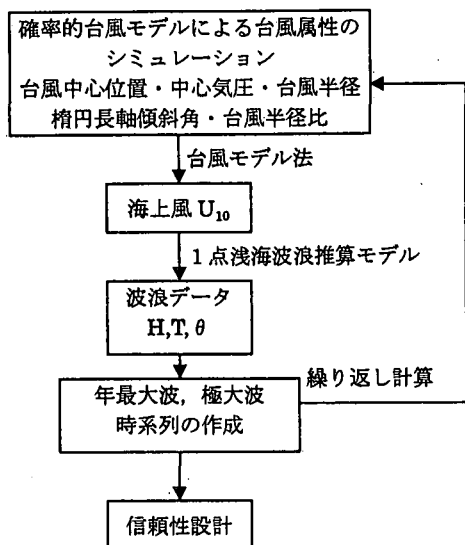
波浪推算には, 山口ら(1987)による 1 点浅海波浪推算モデルを用いた。1 点浅海波浪推算モデルの特徴として, 高地形分解能による高精度の波浪推算が可能であること, 1 地点を対象とした場合, 長期間の波浪推算が比較的短時間でできることがあげられる。波浪推算には, 80 km 格子間隔の北西太平洋領域に 0.5 km 格子間隔の対象地点周辺領域を接続して行う。

④シミュレーション期間の波浪極値データの抽出

波浪推算結果から対象地点におけるシミュレーション期間中の有義波高 2 m 以上の擾乱を抽出した。抽出したデータの中から, 期間中各年ごとの極大波浪データおよび年最大波浪データを作成する。

⑤ピーク値を含む波高・周期・波向の時系列データの作成

* 正会員 工 修 五洋建設(株) 技術研究所
** 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
*** 正会員 工 修 愛媛大学 助手 工学部環境建設工学科
**** 正会員 工 博 愛媛大学 教授 工学部環境建設工学科



図一 確率的台風モデル法による来襲波算定フロー

④で抽出した極大波浪データおよび年最大波浪データから各擾乱のピーク値およびピーク値出現前後数時間の波高・周期・波向データを抽出し、時系列データを作成する。

⑥信頼性設計の実施

⑤で作成した波浪を時系列で与え、信頼性設計を実施する。なお、本研究ではケーソン防波堤の期待滑動量に対する検討を行ったが、ここで示した確率的台風モデル法は消波工の耐波安定性や越波問題など他の信頼性設計法への対応も可能である。

図一に確率的台風モデル法による来襲波算定フローを示す。

3. 信頼性設計に用いる来襲波特性

ここでは、信頼性設計に使用する来襲波の特性について検討する。本研究で対象とした地点は、台風による波浪の影響が大きいと考えられる太平洋岸の伊豆半島先端に位置する石廊崎（水深 50 m）である。

3.1 確率的台風モデル法による来襲波

確率的台風モデルの試行回数は山口ら（1995）の研究を参考に 50 年間のシミュレーションを 100 回行うこととした。台風シミュレーションから台風属性資料を作成し、波浪推算を行うことによって石廊崎地点に来襲する波浪を算出した。ここでは、シミュレートされた全 39549 個の台風の中から 50 年ごとの年最大波および極大波のデータを 100 個作成する。年最大波データ、極大波データともに波高・周期・波向を抽出するとともに、波高のピーク値を挟んで前後 5 時間の時系列データを作成する。

また、確率的台風モデルによる極大波データの極値分

布から年ごとの高波を推定する手法によるデータも併せて作成した。極値分布の推定には合田（1988）の方法を使用した。ここでは、シミュレーション繰返し回数分の極値統計解析結果をもとに、形状母数については、最多出現値を選択し、位置母数および尺度母数について最多出現形状母数における平均値から算出した。

3.2 従来の方法による来襲波

下迫・高橋（1998）による従来の方法（以下、従来法と呼ぶ）で用いられている来襲波の設定法から石廊崎地点の波浪を算出した。従来法は、対象地点の観測データをもとに、極値統計解析から極値分布を推定し、推定された極値分布から高波が 1 年に 1 回発生するものと仮定し、沖波波高を求める手法である。周期については、沖波波形勾配が一定であるとして設定する。また、波向についても防波堤に対して最も危険となる直入射の条件のみを設定している。

ここでは、気象庁により観測されている石廊崎地点の 1976 年～2001 年までの 26 年間 26 個の年最大データを用いて極値統計解析を行い、極値分布を推定した。極値統計解析には合田（1988）の方法を使用した。

3.3 各手法による来襲波の比較検討

各手法で算出した 50 年 100 回分の来襲波における最大値、平均値および標準偏差を表一に示す。ここで比較する来襲波は、確率的台風モデル法から各試行ごとに 50 年間の極大波を抽出したもの（確率的台風モデル法極大波）、確率的台風モデル法から各試行ごとに 50 年間の年最大波を抽出したもの（確率的台風モデル法年最大波）、観測データの代わりに確率的台風モデル法極大波を用いた従来法（確率的台風モデル極値分布）、観測データを用いた従来法の 4 種類である。来襲波の平均は確率的台風モデル法極大波および年最大波の場合は 14.2 m、確率的台風モデル法極値分布では 14.3 m、従来法では 12.1 m となる。確率的台風モデル法極大波と確率的台風モデル法極値分布の結果を比較した場合、最大値は 15% 程度、確率的台風モデル法極大波の方が大きいのに対して、平均値はほぼ同じとなっている。これは、確率的台風モデ

表一 来襲波特性

	$(H_{1/3})_{\max}$ (m)	$(H_{1/3})_{\text{mean}}$ (m)	σ (m)
確率的台風モデル法 極大波	22.7	14.2	1.76
確率的台風モデル法 年最大波	22.7	14.2	1.76
確率的台風モデル法 極値分布	19.4	14.3	1.56
従来法	17.7	12.1	1.69

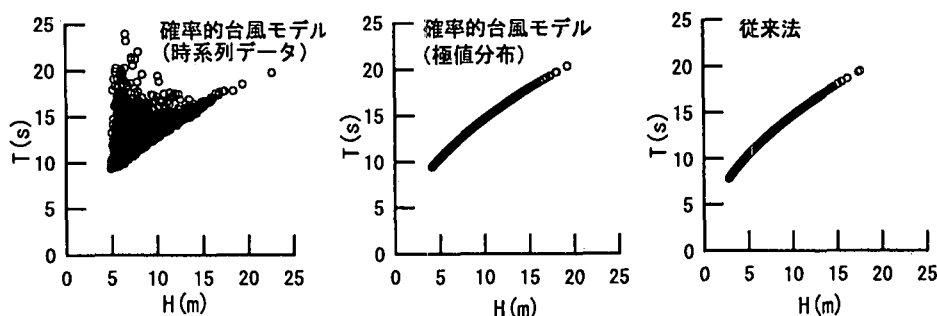


図-2 来襲波の波高と周期の関係

ルの結果はばらつくものの、山口ら (1995) で指摘されているように 100 回の繰り返し計算を行うことにより、統計的に安定した結果が得られていることを示すものと考えられる。従来法との比較では、すべての確率的台風モデル法の結果が大きな値を示している。これは、確率的台風モデルには、対象地点に実際の台風より巨大波浪をもたらす台風が含まれていることによると考えられる。また、楕円型気圧分布を用いた結果は、台風の減衰が進み、気圧分布の楕円型が顕著になる石廊崎においては確率波高をやや過大評価すると野中ら (2000) によって指摘されている。これらの要因が確率的台風モデル法の結果をやや大きく表すものとする。

一方で、従来法に用いられる観測データの極値統計解析結果については、使用する波浪データ特性の影響が大きいと考えられる。観測データ数が少ない場合には、対象地点の波浪の出現確率を適切に評価できないことから極値分布についても適切に評価することができず、結果として確率波高を過大あるいは過小評価する可能性がある。本研究においても観測データは 26 年 26 個であることから、来襲波の値がシミュレーションより小さい値を示す要因として観測資料数の影響が考えられる。

図-2 には確率的台風モデル法極大波、確率的台風モ

デル極値分布および従来法による沖波の波高と周期の結合分布を示す。従来法においては、波形勾配が一定と設定することから、波高の増加に対して周期も単調増加する形となっているが、確率的台風モデル法では波高とともに周期の出現分布についても考慮することが可能であることがわかる。

また、確率的台風モデル法では従来法で考慮できなかった波向の影響についても考慮することが可能である。確率的台風モデル法による時系列データの波高と波向の関係について図-3 に示す。石廊崎地点における波向は、高波浪時には SSW 付近からの波浪の出現確率が高くなっているが、全体的には SE~SW に波向がばらついていることがわかる。このように、確率的台風モデル法では対象地点における波浪の影響を実際の波浪に近い状況で考慮することが可能と言える。

4. 期待滑動量の評価

4.1 期待滑動量算出手順

防波堤の期待滑動量を算出し、来襲波浪の作成法による結果の相違について検討した。期待滑動量の算定には沖波の設定以外は下迫・高橋 (1998) の手法にしたがった。図-4 に計算対象とした堤体の断面を示す。水深は 20 m とし、設計沖波は観測データの極値統計解析より算出した 50 年確率波高の 11.2 m とした。また、潮位については近隣に位置する清水港の値を参考とした。信頼性設

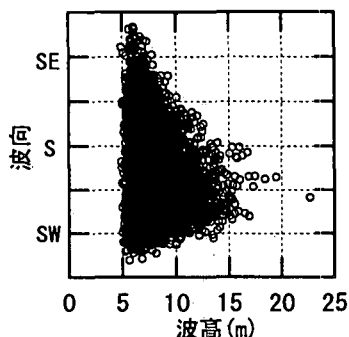


図-3 波高と波向の関係 (確率的台風モデル極大波)

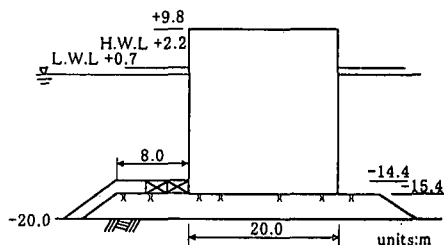


図-4 検討堤体断面

計の手順は、①沖波の設定、②潮位の設定、③波浪変形の効果を反映した堤体位置の有義波高、④砕波の影響を考慮したレイリー分布に基づく個々波、⑤合田の波圧算定公式による堤体作用波圧、⑥滑動モデルによる1波の滑動量、⑦供用期間中の滑動量、⑧期待滑動量・被災遭遇確率の算定である。本研究で用いた期待滑動量および被災遭遇確率の算定手順について図-5にフローを示す。

下迫・高橋（1998）の研究において、信頼性設計では、期待滑動量が安定した変動幅になるためには5000回程度の試行回数が必要であるとしている。しかしながら、100回程度の試行回数から期待滑動量の変動幅は比較的落ち着いていること、および確率的台風モデル法の計算時間を考慮して本検討では100回の試行とした。

4.2 期待滑動量の比較検討

前述の各手法により算定した来襲波を与えて、信頼性

設計を実施した結果から期待滑動量・被災遭遇確率について検討する。表-2に期待滑動量および被災遭遇確率の計算結果を示す。継続時間は堤体に滑動をおよぼす可能性のある高波が継続的に来襲する時間を想定したものである。確率的台風モデル法極大波および年最大波では、2時間の継続時間に対応する波浪として各擾乱のピーク値とその1時間後の値を来襲波として与える。また、確率的台風モデル極値分布および従来法によって波浪を与えた信頼性設計による期待滑動量および被災遭遇確率については、同じ波浪が2時間続いた場合および1時間続いた場合について示した。

従来法では、統計年数の不足が要因と考えられる設定波高における過小評価の可能性を指摘した。こうした場合には、ここでの結果が示すように期待滑動量の算定結果も過小評価すると考えられる。一方、極値分布のあてはめ状況によっては、逆に設定波高を過大に見積もり、期待滑動量を過大評価する可能性も考えられる。

確率的台風モデル法極大波を用いた結果は年最大波の結果に比べ、本検討条件では約5割期待滑動量が大きくなった。したがって、年最大波のみを用いて検討した場合は期待滑動量を過小評価する可能性がある。確率的台風モデル法極値分布を用いた結果は、他の手法と比較して、期待滑動量が非常に大きくなっている。信頼性設計に与えた波浪について比較すると、波高については平均値および最大波高ともに確率的台風モデル法極値分布、確率的台風モデル法極大波および年最大波に大きな差はない。したがって、確率的台風モデル法極値分布では波浪の堤体への作用角度の影響が大きかったものと考えられる。

波向を含めて時系列的に解析する確率的台風モデル極大波と極値データを用いる確率的台風モデル極値分布の比較から波向の影響が大きいことが確認できた。したがって、従来法において波向の影響を考慮するとさらに期待滑動量が小さくなる可能性がある。このことから、信頼性設計法を用いた設計においては波浪の設定に細心の注意が必要と考える。

4.3 高波の継続時間の検討

高波の継続時間の影響を検討するために、高波の継続時間の確率的出現特性を考慮した従来法の波浪時系列データを作成した。これは、確率的台風モデル法において波浪の経時変化が考慮できることに対応して、従来法においても継続時間中の波浪変化の影響を反映させた検討を行うものである。ここでは、鶴飼ら（1993）の手法を用いて極値分布より推定された来襲波に対して、一時化を5時間とする波浪の時系列データを作成する。

確率的台風モデル法極大波、従来法および上述の方法により波浪の経時変化を考慮した従来法の3種類を用い

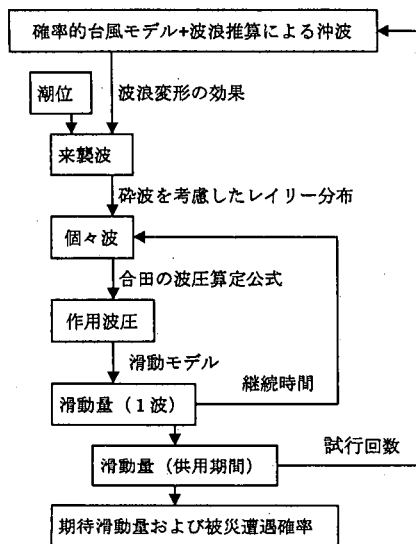


図-5 期待滑動量算定フロー

表-2 期待滑動量および被災遭遇確率

	継続時間	期待滑動量	被災遭遇確率
確率的台風モデル 極大波	2 h	0.34 m	10.0%
確率的台風モデル 年最大波	2 h	0.22 m	4.0%
確率的台風モデル 極値分布	2 h	3.55 m	63.0%
確率的台風モデル 極値分布	1 h	2.97 m	56.0%
従来法	2 h	0.26 m	9.0%
従来法	1 h	0.10 m	6.0%

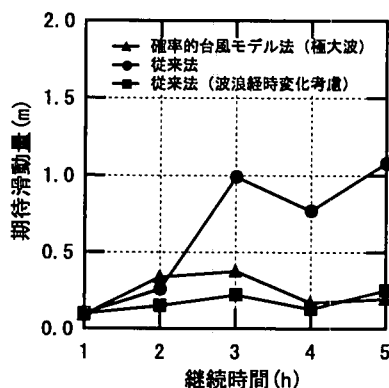


図-6 期待滑動量と継続時間の関係

て算出した期待滑動量と継続時間の関係について図-6に示す。確率的台風モデル法極大波および波浪の経時変化を考慮した従来法では、継続時間が1時間の場合はピーク波浪、2時間の場合はピーク値とその1時間後の波浪、3時間の場合はピーク波浪をはさむ前後3時間の波浪というように、継続時間に対応してピーク波浪を含む波浪の時系列データを与えた。一方、従来法では同一の極値分布による波浪が継続時間分だけ続くとして波浪を与えた。従来法の結果は継続時間が長くなるにつれて期待滑動量が大きくなる傾向を示している。これに対して、波浪の経時変化を考慮した2種類は継続時間が2時間以上になると期待滑動量は安定した値となっていることがわかる。したがって、波の継続時間が期待滑動量に与える影響は大きいと考えられることから、従来法による検討を行う場合には継続時間の取り方に注意が必要である。また、従来の信頼性設計法において高波の作用時間は2時間と設定されているが、実際には堤体の安定性に影響する作用時間は台風の経路や勢力に大きく左右されることが考えられる。したがって、確率的台風モデル法のように波浪の発達から減衰までを時系列的に算出することができる手法を信頼性設計に用いることが、継続時間の影響をより現実的に評価できると考えられる。

5. おわりに

本検討では、確率的台風モデルに波浪推算モデルを組み合わせるにより沖波を評価し、信頼性設計に取り込む手法を構築した。ここでは、防波堤の期待滑動量の算出に対する検討を行い、システムの適用性について検討した。

その結果、確率的台風モデル法を用いて期待滑動量を評価する手法では従来法で考慮できなかった、周期、波向および波浪の経時変化の影響を考慮することが可能となり、実際の波浪に近い状況を設計に取り入れることが可能となる。

確率的台風モデルと波浪推算を組み合わせた手法では、波浪推算精度の向上および結果の検証法の確立が今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 鶴飼亮行・清水琢三・山口正隆 (1993): 実測値に基づく高波の継続時間の確率的出現特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 121-125.
- 合田良実 (1988): 極値統計におけるプロット公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第1号, pp. 31-92.
- 合田良実・高木泰士 (1999): 信頼性設計法におけるケーソン防波堤設計波高の再現期間の選定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 921-925.
- 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, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝 (2000): 拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推算システム, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 271-275.
- 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博 (1987): 一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 151-160.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲 (1994): わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 206-210.
- 山口正隆・畑田佳男・大木泰憲・西村敦博・中村雄二 (1995): 確率的台風モデルに基づく台風時浅海波浪の極値推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 246-250.