

孤立型海洋構造物に作用する不規則波力の確率分布評価方法

Evaluation of Probability Distribution of Wave Force Acting on Isolated Offshore Structure

福山貴子¹・池谷毅²・福本幸成³

Takako FUKUYAMA, Tsuyoshi IKEYA and Yukinari FUKUMOTO

Regarding the isolated offshore structures, e.g., bridge foundations, sea berths or an offshore wind farm, the plural structures are constructed in an offshore area, and sometimes the collapse of one structure loses the important function of the facility. We propose the method for evaluating the probability distribution of wave force acting on the isolated structure and the probability of destruction of one or plural structures. To calculate the probability distribution of wave force, we set the log-normal distribution to the wave force acting over the still water level, and the normal distribution to the wave force acting under the still water level. The calculated distribution well agreed with the experimented data. This method can be applicable to the isolated structures of arbitrary shape.

1. はじめに

港湾の施設に関する技術上の基準が改定され、構造物の性能設計が採用されるようになった。性能設計法に関しては、長尾ら（1998）や高木（2007）など、各種防波堤や護岸に対しては多数研究が行なわれている。

本研究では、橋梁基礎やシーバース、洋上ウィンドファームなどの孤立型海洋構造物を対象に、作用波力を確率的に評価する方法の検討を行なった。これらの構造物基礎は、ある海域に複数基が設置され、そのうち1基でも被災すると、重大な機能の喪失となる場合が多い。そこで本研究では、孤立型海洋構造物1基に作用する波力の確率分布を求める方法を提案し、これを適用して1基あるいは複数基設置する場合の被災確率を評価する方法を示す。なお、作用波は一方方向の不規則波とし、衝撃砕波力を含む波力が作用する場合を対象とした。

2. 検討方法

本手法の検討フローを図-1に示す。本手法では、まず、沖波条件を与えて、構造物設置水深での波高分布を計算する。得られた波高分布を任意の数に分割して、波高クラスを設定する。続いて、各波高クラスの規則波が作用する場合の、構造物に作用する波力を求める。さらに、波高クラスごとにばらつきを設定し、各波高クラスの波力分布を求める。これを全ての波高クラスに対して実施し、得られた各波高クラスの波力分布を、波高の出現確率を乗じて全波高クラスで積分する。以上より、設定し

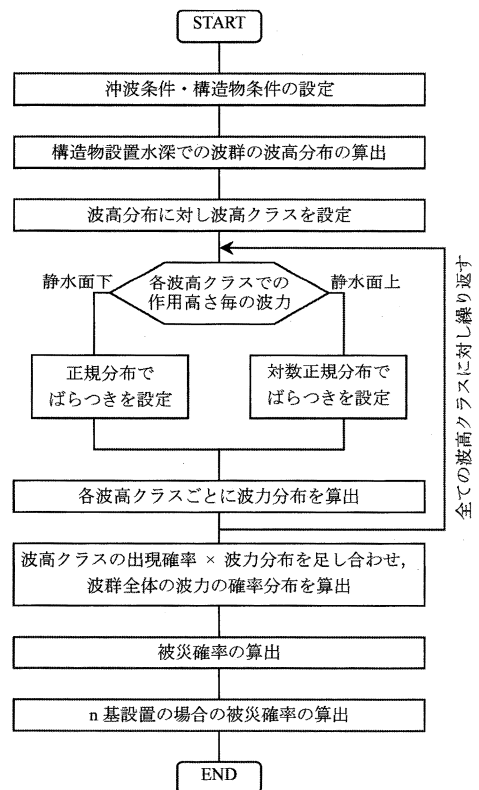


図-1 検討フロー図

た波群に対する波力分布を求めることができる。

得られた波力分布を用いて、滑動・転倒などの被災確率を求めることができる。さらに、複数基設置する場合には、1基の被災確率を用いて、複数基設置するうちの1基が被災する確率を求める。

1 正 会 員 工 修 鹿島建設（株）技術研究所
2 フェロー 工 博 鹿島建設（株）技術研究所
3 正 会 員 工 修 東京電力（株）技術開発研究所

3. 被災確率の算出方法の計算例

本章では、前出のフローの計算手順を、実例を挙げて具体的に示す。

(1) 沖波条件・構造物条件の設定

本研究では、谷本ら（1986）による円柱に働く衝撃砕波力に関する実験のデータを参考に用いた。表-1に検討条件を示す。

(2) 波高分布および波高クラスの設定

表-1に示す沖波波高・周期条件と、海底勾配、構造物の設置水深から、合田（1975）の方法により、波高分布を求めた。図-2に波高分布を示す。

波高クラスの設定は、波高分布の形状を再現できる程度の間隔が必要である。本計算例では、図-2にプロットで示したように、横軸 H/H_{avg} のピッチを0.02として設定した。

(3) 作用波力の算出

構造物に作用する波力の算出にはモリソン式を用いた。波力の計算結果を図-3に示す。対象構造物に作用する波力は、波高が小さい場合は静水面より下部に作用する波力の方が大きい。が、 H/h が0.6程度より大きくなると、静水面より上部に作用する波力が大きくなり、静水面より下部に作用する波力はそれほど大きくなっていないことが分かる。

(4) 波力のばらつきの設定

波力のばらつきは、谷本らの実験結果から、衝撃砕波力が作用すると考えられる、静水面より上部に作用する波力のばらつきは、式(1)で表わす対数正規分布、静水面より下部に作用する波力のばらつきは、式(2)で表わす正規分布、とした。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\zeta x)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (1)$$

λ : $\ln X$ の平均値

ζ : $\ln X$ の標準偏差

X : 静水面より上部に作用する無次元化波力

$$= F_X \sqrt{F_X}$$

$F_X(F_Y)$: 静水面より上部（下部）に作用する個々波による波力

$\overline{F_X}(\overline{F_Y})$: 静水面より上部（下部）に作用する個々波による波力の平均値

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

μ : Y の平均値

σ : Y の標準偏差

表-1 検討条件

沖波有義波高	H_0	8.0m
沖波有義波周期	T_0	11.5s
構造物設置水深	h	10m
海底勾配	i	1/30
円柱径	D	2m

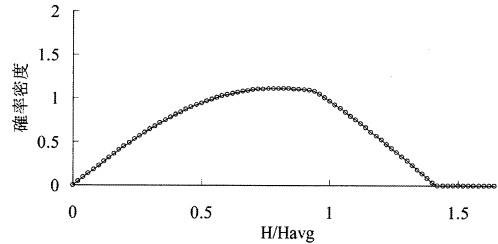


図-2 波高分布

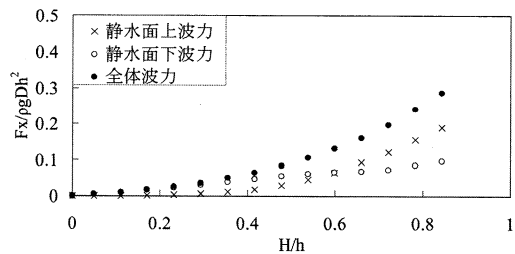


図-3 計算波力

Y : 静水面より下部に作用する無次元化波力

$$= F_X \sqrt{F_X}$$

このとき、全体に作用する無次元化した波力 Z を

$$Z = (aX + bY)/c \quad (3)$$

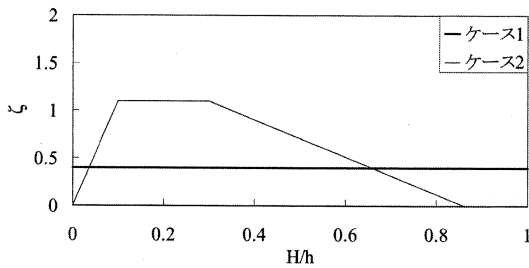
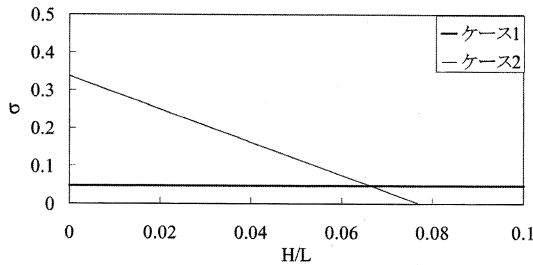
a : 静水面より上部に作用する計算波力

b : 静水面より下部に作用する計算波力

c : 全体に作用する計算波力

とすると、全体無次元化波力 Z のばらつきは、両者を用いて得られる次式(4)の確率密度関数で表わされる。

$$f_Z(z) = \frac{c}{2\pi b \sigma \zeta} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\lambda}{\zeta} \right)^2 + \left(\frac{cz - b\mu}{b\sigma} \right)^2 \right\} \right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\ln x}{\zeta} \right)^2 + \left(\frac{ax}{b\sigma} \right)^2 \right\} + \frac{\lambda \ln x}{\zeta^2} + \frac{ax(cz - b\mu)}{(b\sigma)^2} \right] dx \quad (4)$$

図-4 対数正規分布のパラメタ σ の分布図-5 正規分布のパラメタ σ の分布

(5) 波力分布の計算例

平均値 λ , μ はそれぞれ0.0, 1.0とした。標準偏差 ξ , σ は、図-4および図-5に示すように、一定とした場合と、波高および波形勾配によって変化させた場合の2ケースで計算を行なった。

a) ケース1

ケース1では、標準偏差 ξ , σ を一定とした場合のシミュレーション結果を示す。

図-6は、式(4)から求めた各波高クラスでの波力の確率分布である。波力が小さい部分では、分布の幅が小さくピーク値が大きいのに対して、波力が大きい部分では、分布幅が大きくピーク値が小さくなっている。

図-7には、図-6に示した全波高クラスでの波力分布を積分して得られた、波群に対する波力の分布を示す。波力が大きい方向に非常に裾が広がった形状になっていることが分かる。

図-8は、各波高クラスでの波力の計算結果（プロット）に対して、図-6で示した確率密度を重ね、波高ごとのばらつき度合いを示したものである。このケースではばらつきを波高によらず一定と考えているため、波高が大きいほどばらつきが大きくなっている。また、波高が大きいほど静水面上の波力が大きくなるため、対数正規分布の影響が表れて、波力が大きい側へ裾が伸びる分布形状となっていることが分かる。ただし、波高が小さい場合の分布幅が非常に小さくなっている。

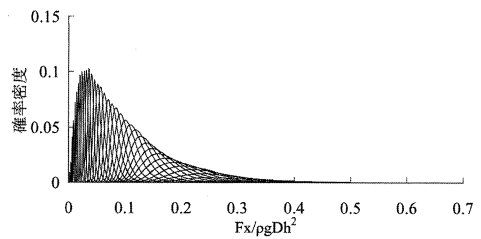


図-6 各波高クラスでの波力の確率分布（ケース1）

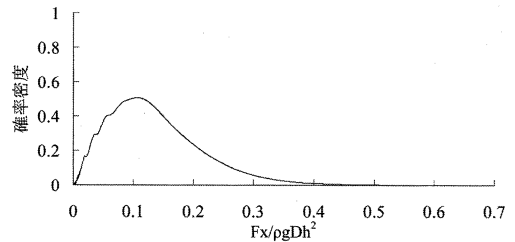


図-7 全体波力の確率分布（ケース1）

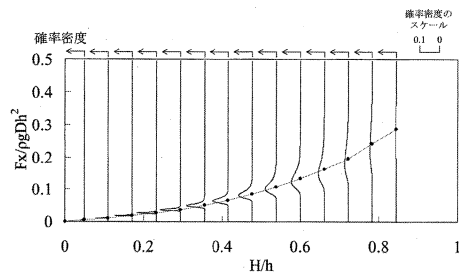


図-8 全体波力のばらつき（ケース1）

a) ケース2

ケース2では、図-4および図-5に示すように標準偏差 ξ , σ を変化させた場合のシミュレーション結果を示す。

対数正規分布のパラメタ ξ は、波高が大きい場合と小さい場合に小さくなり、その間では一定となる3直線、正規分布のパラメタ σ は、波形勾配が大きくなるほど小さくなる1直線とした。シミュレーションの結果を図-9から図-11に示す。

ケース1と比較すると、波力が小さい部分での分布幅が大きく、ピークが小さくなる形状になっている。また、全波高クラスを積分して得られた全体波力の分布形状を見ると、ケース1と比較して、ピーク値はほとんど変わらないものの、波力が大きい側にケース1ほどは広がっていない、といった差が出る事が分かる。

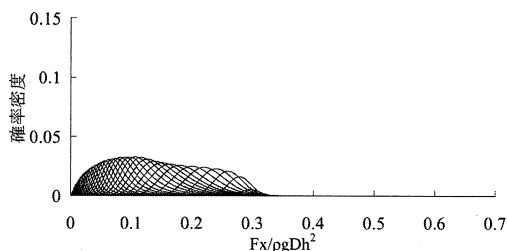


図-9 各波高クラスでの波力の確率分布 (ケース2)

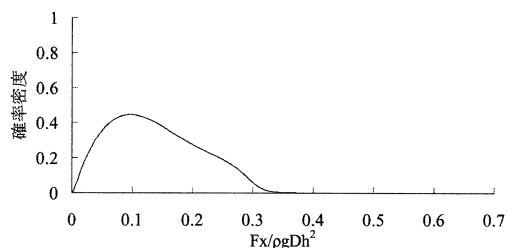


図-10 全体波力の確率分布 (ケース2)

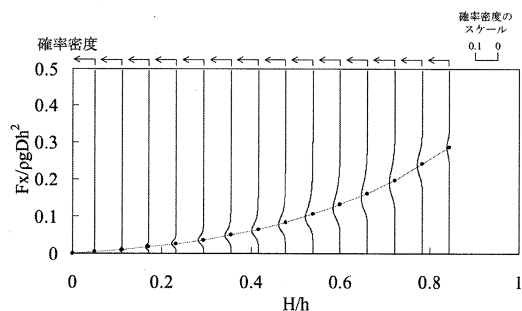


図-11 全体波力のばらつき (ケース2)

表-2 被災検討結果

	ケース1		ケース2	
	被災確率	割増率	被災確率	割増率
1基	1.320E-03	—	3.092E-05	—
2基	2.637E-03	1.091	6.184E-05	1.062
5基	6.580E-03	1.238	1.546E-04	1.160
10基	1.312E-02	1.375	3.092E-04	1.243

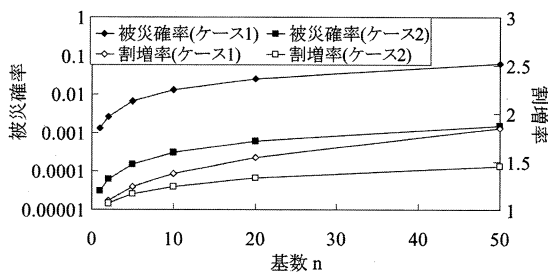


図-12 被災確率および割増率

(6) 被災確率の推定

$F_x/\rho g D h^2$ が0.5を越える場合に被災すると仮定し、図-7および図-10で得られた全体波力の確率分布から、1基あるいは複数基中1基が被災する確率 p_f を求めた。n基中1基が被災する確率 p_{fn} は、1基が被災する確率 p_f を用いて、下記式(5)で求めた。なお、ここで求めた被災確率は、表-1に示した沖波条件の波浪が1回(2~300波程度以上)作用するとした場合に、構造物が被災する確率である。

$$p_{fn} = 1 - (1 - p_f)^n \quad (5)$$

また、複数基設置する場合には、全体の被災確率が、1基が被災する確率と同じ被災確率とするために必要な、設計耐力の割増率を求めた。割増率は、複数基設置する場合の被災確率から、図-7および図-10を用いて、複数基設置する場合の被災確率に相当する波力を求め、1基の耐力で割って求めたものである。被災確率と割増率を求めた結果を表-2および図-12に示す。

構造物の数が多くなるほど被災する確率が増大していることが分かる。本検討ケースでは、構造物を10基設置した場合に、全体の被災確率を1基の被災確率と同じにするためには、設計耐力を約1.3~1.4倍にしなければならないことが分かる。

4. 実験データによる波力確率分布の検証

ここでは、別途実施した孤立型構造物の波力実験の結果と、本手法によるシミュレーション結果との比較を示す。

(1) 実験概要

実験条件を表-3に示す。対象とした孤立型海洋構造物の形状を図-13に示す。対象構造物の形状は、上部斜面式の軸対称構造物である。また、波力実験の概略図を図-14に示す。構造物模型を上部から水中6分力計により支持して造波を行ない、構造物に作用する6分力計を計測した。

表-3 実験条件

沖波波高	H_0	15.25cm
周期	T_0	1.62s
構造物設置水深	h	25.0cm
海底勾配	i	1/100
構造物代表径	D	16.05cm

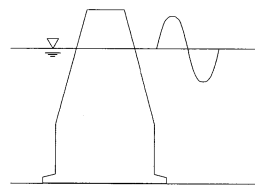


図-13 対象構造物形状

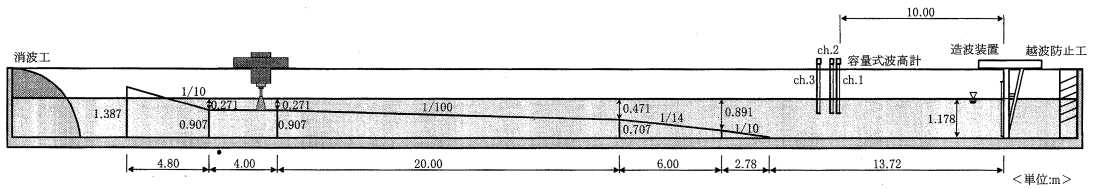


図-14 波力実験概略図

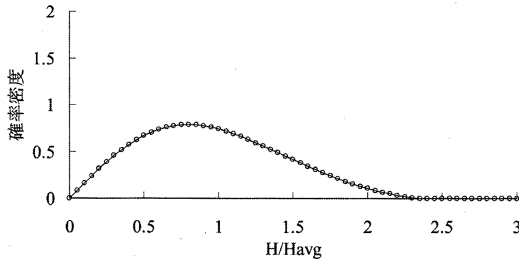


図-15 波高分布

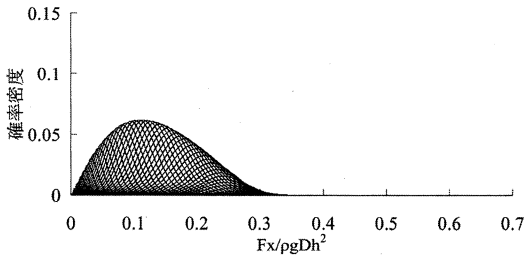


図-16 各波高クラスでの波力の確率分布

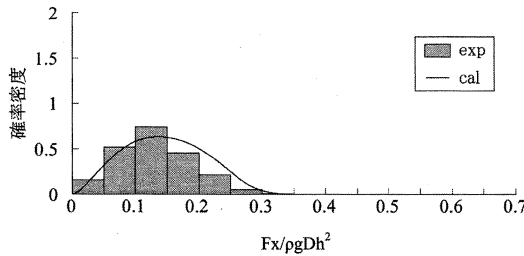


図-17 全体波力の確率分布

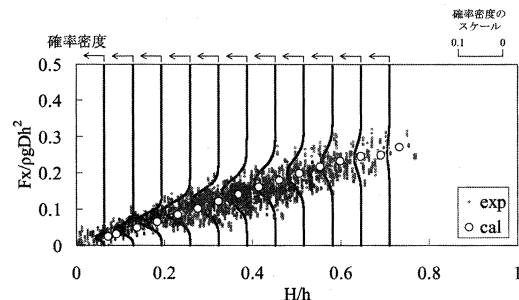


図-18 実験データとシミュレーション結果の比較

(2) 実験結果との比較

図-15に波高の確率密度分布を、図-16に各波高クラスでの波力の確率密度分布を示す。構造物に作用する波力の算出には、池谷ら（2006）による修正モリソン式を用いた。また、本検討では、標準偏差 σ を、3章のケース2と同様とし、波高および波形勾配によって変化した値を用いた。図-17には全波高クラスで積分して得られた波力の確率密度分布と、実験結果を示す。シミュレーション結果は波力の大きい側での値が実験結果よりもやや大きいものの、概ね実験結果と良く一致している。また、図-18には、個々波の波高と波力の関係をプロットしたものと、シミュレーションから求めた波力の分布形状を示す。シミュレーション結果は、精度良く実験結果のばらつき範囲をカバーしていることが分かる。

5. まとめ

本研究では、孤立型海洋構造物に作用する、衝撃砕波力を含む不規則波による波力の確率的評価方法を提案した。本手法を用いることによって、構造物の被災確率および複数基設置する場合の設計耐力の割増率を求めることが可能となることを示した。さらに、本手法によるシミュレーション結果と、波力実験による結果を比較し、シミュレーション結果が、波力実験値の分布を良く再現できることが確認できた。

本手法は、孤立型海洋構造物の形状によらず、波力の確率分布を設定することが可能となるため、様々な構造物に応用が効くと考えられる。

参考文献

- 池谷毅・福山貴子・稲垣聡（2006）：上部斜面式軸対称ケーソンに作用する波力と揚圧力，海洋開発論文集，第22巻，pp. 313-318.
- 合田良実（1975）：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 59-106.
- 高木泰士（2007）：レベル3信頼性設計法を用いた防波堤全体系の最適化手法，海岸工学論文集，第54巻，pp. 911-915.
- 谷本勝利・高橋重雄・金子忠男・塩田啓介・小蔵統一郎（1986）：円柱に働く衝撃砕波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第25巻，第2号，pp. 29-87.
- 長尾毅・大久保昇・川崎進・林由木夫（1998）：信頼性設計法による防波堤の全体系安全性（第3報）－レベル1，2の設計法の適用性総括－，港湾技術研究所報告，第37巻，第2号，pp. 131-176.