

防波堤の性能設計における機能損失確率の推定について

東京電力(株) 正会員 赤石沢総光 東電設計(株) 正会員 長舩 徹
東京電力(株) 正会員 興野俊也 東電設計(株) 正会員 阿部光信

1. はじめに

著者らはケーソン式防波堤の性能設計の活用検討において堤体の滑動と沈下の2つの損傷モードに着目し、モンテカルロ法を用いて防波堤の変形量の確率分布を算定するとともに、防波堤の安全性を照査する評価指標として a)期待変形量, b)機能損失確率, c)ライフサイクルコストに着目した3つの照査方法を示した¹⁾。このうち機能損失確率による照査は、波浪により防波堤機能が損なわれるような被害の遭遇確率に着目したもので、公共性の高い港湾施設に対しては非常に重要な評価指標である。本論文は防波堤の滑動被災に着目して、波浪ハザード曲線と滑動被災に対するフラジリティ曲線を提示するとともに、これらに基づき機能損失確率を推定する方法を示す。また、著者ら¹⁾が提案するモンテカルロ法により算定される機能損失確率との比較を行う。

2. 防波堤の機能損失レベルの設定

滑動被災に着目した場合、機能損失確率は防波堤機能が損なわれる限界滑動量を超える滑動量の出現頻度として算定できる。機能損失に至る限界滑動量の設定にあたっては港湾の長期機能喪失を回避する観点からケーソン本体が捨石マウンドから転倒するぎりぎりの状態を限界状態とし、限界滑動量は港内側マウンド肩幅に設定した。図-1の検討対象断面では6.5mである。

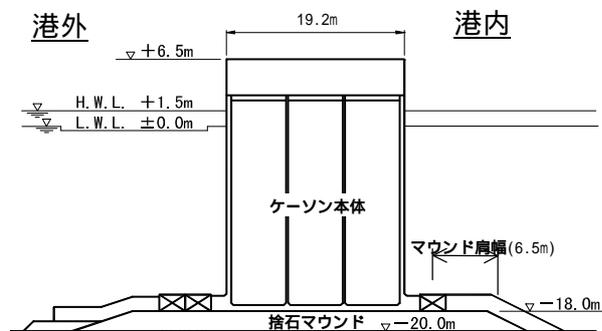


図-1 検討対象断面

3. 波浪ハザードと防波堤の

フラジリティに基づく機能損失確率の推定

(1) 波浪ハザード曲線の算定

波浪ハザード曲線とは、横軸に沖波波高 H_0 、縦軸にその年超過確率 $p(H_0)$ を示したもので、特に性能設計体系において設計波高レベルを設定する際にその発生頻度に関する有用な情報を与える。図-2は太平洋岸のモデル地点で得られた波高データを基に極値統計解析から算定された波浪ハザード曲線であり、ワイブル分布に従うと考えられ、(1)式のように表される。

$$p(H_0) = \exp \left[- \left(\frac{H_0 - B}{A} \right)^k \right] \quad (1)$$

ここに、 $A = 2.748$ 、 $B = 2.802$ 、 $k = 2.000$

なお、図-2にはいくつかの再現期間に対応する設計確率波高を示している。

(2) 滑動被災に対するフラジリティ曲線の算定

本検討で扱うフラジリティ曲線とは、横軸に沖波波高 H_0 、縦軸にその波高が発生したという条件での機能損失確率 $F_r(H_0)$ を示したものであり、何組かの H_0 、 $F_r(H_0)$ の点を結ぶことにより描くことができる(図-3参照)。この曲線は地震リスクを評価する際に構造物の耐力(抵抗)側の不確定性を確認する場合などに用いられ、本検討ではこれを防波堤の滑動被災に適用したものである。性能マトリックスを活用した設計等、

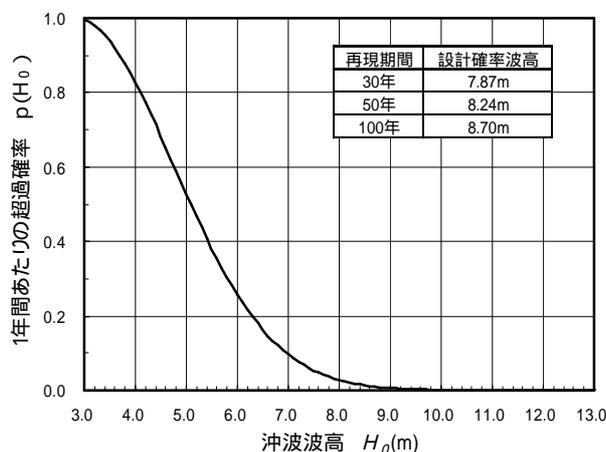


図-2 波浪ハザード曲線

キーワード：性能設計 機能損失 波浪ハザード フラジリティ 連絡先(〒230-8510, 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1, TEL045-613-3376)

所与の外力(設計波高)レベルにおける性能の満足度合を確率指標により確認できる意味で便利である。図 - 3 中には、いくつかの設計確率波高に対する機能損失確率値も示している。本検討断面では沖波波高 7.0m 程度から機能損失確率が出現し波高増大とともに増加している。ここで所与の沖波波高値に対する機能損失確率は、谷本ら(1996)²⁾の滑動量算定モデルを用いるとともに、表 - 1 に示す設計条件のばらつきを考慮してモンテカルロシミュレーションによって算定した。なお、ばらつき分布は平均値の偏りならびに変動係数で規定される正規分布³⁾を仮定した。

(3) 機能損失確率の算定

年機能損失確率 p_F は(2)式に示すように、波浪ハザード曲線とフラジリティ曲線の合積より求められる。

$$p_F = \int_0^{\infty} -\frac{dp(H_0)}{dH_0} \cdot F_r(H_0) dH_0 \quad (2)$$

また(2)式の被積分関数は、図 - 4 に示すような機能損失の年確率密度を表し、この分布の面積が年機能損失確率 p_F である。また、耐用年数 T 年間における機能損失確率 P_{FT} は二項分布を仮定して(3)式により算定される。

$$P_{FT} = 1 - (1 - p_F)^T \quad (3)$$

以上の推定方法に基づき耐用年数 50 年とした場合、図 - 1 に示す検討断面の機能損失確率は 5.2×10^{-3} と算定される。

4. 推定方法の違いによる機能損失確率の比較

表 - 1 に示すように他の確率変数と同様、沖波波高も確率変数の一つとしてモンテカルロ法を行えば、防波堤の滑動量の確率分布から機能損失確率を算定できる。この場合、沖波の出現頻度を年に 1 回として耐用年数 50 年でシミュレーションを行うと機能損失確率の推定結果は 5.5×10^{-3} となる。これは前章で提案した方法による推定結果とほぼ同程度あることが確認された。

5. まとめ

本論文では耐震設計でよく用いられるハザードおよびフラジリティ解析を防波堤の滑動被災に適用し、波浪ハザード曲線およびフラジリティ曲線に基づき機能損失確率を推定する方法を提案した。ハザードおよびフラジリティによる方法は各々それだけで設計上有用な確率情報を与えるものであり、今後、変形量に基づく確定論的な限界状態設計法を構築しその融合を図るうえで、本論文で示した波浪ハザード・フラジリティによる安全評価手法を有効に活用していきたい。

参考文献：

- 1) 興野ら(2000)：性能設計活用による防波堤の設計合理化について，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.816-820.
- 2) 谷本ら(1996)：混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル，海岸工学論文集，第 43 巻，pp.846-850.
- 3) 高山ら(1994)：防波堤の信頼性設計に向けて，港湾技研資料，No.785

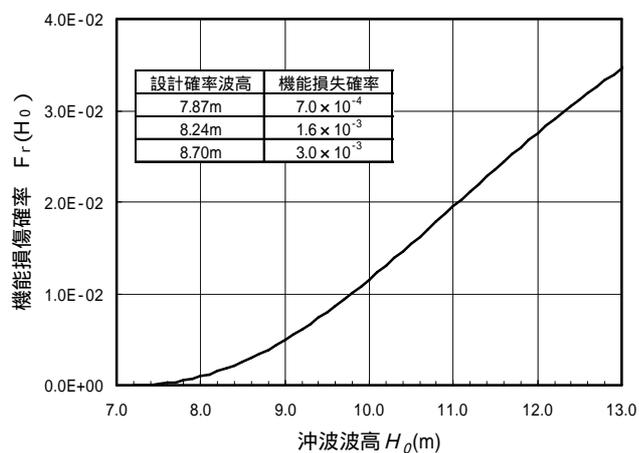


図 - 3 防波堤のフラジリティ曲線(滑動被災)

表 - 1 設計条件のばらつき

不確定要因	分布形	平均的偏り	変動係数
堤体自重	ばらつきは考慮しない		
沖波波高	設計値 (確定値)		
波浪変形係数	正規分布	0.00	0.10
波力算定	正規分布	0.00	0.10
摩擦係数	正規分布	0.00	0.10
潮位	正規分布	0.00	0.415
継続時間	正規分布	-	6.84*
周期	正規分布	-	2.00*

* 標準偏差で表示

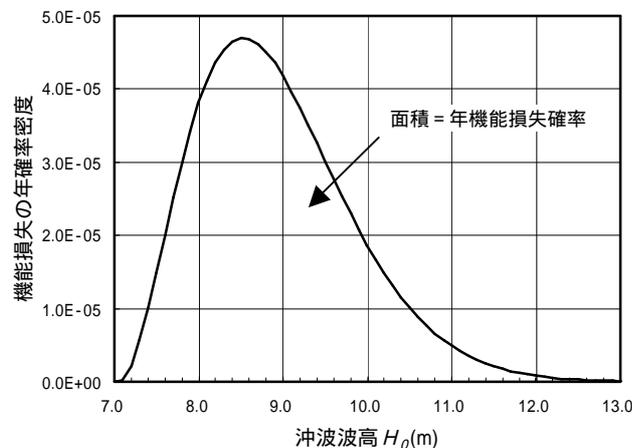


図 - 4 機能損失の年確率密度