

防波堤の耐波信頼性評価法に関する一考察

広島工業大学工学部
パシフィックコンサルタンツ（株）

正員　○ 中山 隆弘
亀田 晃一

1. はじめに

土木構造物は通常自然環境下に造られるので、作用する外力はもちろんであるが、その他に構造物の強度に関する物理量にも確定論的予測の困難な種々の不確実性が含まれる。したがって、構造物の安全性・信頼性を定量的に評価し、そのライフタイムにおけるリスクを議論するためには、不確実性の問題を避けては通れない。

本研究では、港湾構造物である混成防波堤を解析対象とし、設計波高およびケーソンとマウンド間の静止摩擦係数に不確実性が存在するとして、1次ガウス近似法の防波堤の信頼性評価法への適用性を探ってみた。その精度については一般的なモンテカルロ・シミュレーション法によって検討を行った。

2. 解析条件

解析の対象とした混成防波堤の形状を図-1に示す。破壊モードとしては、今回はランダム性を有する波の作用に対する防波堤の滑動抵抗力の不足による破壊のみを考えた。その場合、波圧式¹⁾（合田式）の関係で性能関数を陽形式で与えられないため、まず、モンテカルロ・シミュレーションにより波圧式の計算ルートを探索し、その結果を基に性能関数を定め、1次ガウス近似法による信頼性解析を行った。

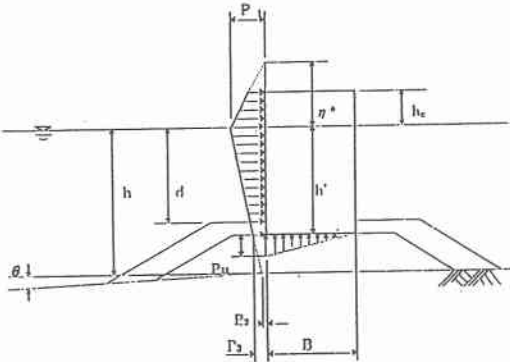


図-1 混成防波堤の形状

表-1に今回の解析に用いた各確率変数の確率特性を、表-2に確定変数とした設計変数の値を示す。なお、表-1における μ は平均値、 σ は標準偏差である。また、波高分布は簡便のため、ワイブル分布ではなく、あえて正規分布とした。

さて、シミュレーションの結果、この場合、波圧式の計算ルートが2つに限定されることが確認できた。ここでは、それらをそれぞれ

ルート1およびルート2と称することにする。このとき、性能関数は式(1)で与えられる。式中

の U (揚圧力)、 P (波力)の計算式が、ルートによって異なることになる。

$$Z = \mu_f (W - U) - P \cdots \cdots (1)$$

式中、 μ_f :静止摩擦係数、 W :防波堤の自重、 U :揚圧力、 P :波力である。

図-2は、解析に用いた換算沖波波高の確率密度関数であり、各波圧式が適用される範囲が示されている。

表-1 換算沖波波高と摩擦係数の確率特性

確率変数	混成防波堤の設計変数	パラメータ	単位	分布型
H_0	換算沖波波高	$\mu = 4.5, \sigma = 0.4$	(m)	正規
μ_f	防波堤とマウンド間の摩擦係数	$\mu = 0.6, \sigma = 0.06$	—	正規

表-2 防波堤断面等の緒量

確率変数	混成防波堤の設計変数	パラメータ	単位
h	防波堤の設置水深	9.5	(m)
h'	防波堤の底面から静水面までの高さ	6.5	(m)
d	マウンドから静水面までの高さ	5.0	(m)
h_c	静水面から防波堤の天端までの高さ	4.0	(m)
B	防波堤の幅	15.0	(m)
W, L	潮位	0.6	(m)
β	波の入射角	15.0	(度)
γ	防波堤の単位体積重量	2.2	(tf/m ³)
W_0	海水の単位体積重量	1.0	(tf/m ³)
$\tan \theta$	海底の勾配	0.01	(m/m)

3. 条件付確率変数の処理

1次ガウス近似法を本問題に適用するために、条件付確率変数の正規化近似が必要となるので、簡単に述べておく。同方法では非正規確率変数については、式(2)によって与えられる期待値および標準偏差を有する正規確率変数によって近似的に扱う²⁾。

$$\begin{aligned}\mu_{x_j}' &= x_j' - \left[\Phi^{-1} \left\{ F_{x_j}(x_j') \right\} \right] \cdot \sigma_{x_j}' \\ \sigma_{x_j}' &= \frac{\varphi \left[\Phi^{-1} \left\{ F_{x_j}(x_j') \right\} \right]}{f_{x_j}(x_j')} \quad (2)\end{aligned}$$

式中

$F_{x_j}(x_j)$: 正規化近似を行いたい確率変数 x_j の確率分布関数
 $f_{x_j}(x_j)$: 正規化近似を行いたい確率変数 x_j の確率密度関数
 $\Phi(x_j)$: 標準正規確率分布関数
 $\varphi(x_j)$: 標準正規確率密度関数

である。

なお、条件付き正規確率分布の分布関数および密度関数は式(3)のように表すことができる³⁾。

$$\begin{aligned}F(x) &= \frac{1}{\{\Phi(\lambda u) - \Phi(\lambda l)\}} \left\{ \Phi \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right) - \Phi(\lambda l) \right\} \\ f(x) &= \frac{1}{\{\Phi(\lambda u) - \Phi(\lambda l)\} \cdot \sigma_x} \cdot \varphi \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)\end{aligned} \quad (3)$$

4. 解析結果および考察

表-3に1次ガウス近似法による解析結果（ β ：安全性指標、 P_f ：破壊確率）とシミュレーションによって得られた結果を併せて示す。

表-3 数値計算結果

計算手法	ルート1		ルート2		全体の評価	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
1次ガウス近似法	3.44	2.98×10^{-4}	2.94	1.64×10^{-3}	3.10	9.61×10^{-4}
モンテカルロ法	3.56	1.60×10^{-4}	2.95	1.58×10^{-3}	3.14	8.30×10^{-4}

の数值は、式(4)より、無条件確率

分布で与えられる換算沖波波高に対する安全性の評価結果であると考えられる。

$$\begin{aligned}P_f &= P_{ro}[(E \cap W_1) \cup (E \cap W_2)] \\ &= P_{ro}[E_1 / W_1] \cdot P_{ro}[W_1] + P_{ro}[E_2 / W_2] \cdot P_{ro}[W_2]\end{aligned} \quad (4)$$

式中、 E は防波堤の滑動が生じる事象、 W_1 は波高が2.6(m)から4.5(m)に、 W_2 は波高が4.5(m)から6.5(m)に存在する事象である。本結果より、ここで提案した方法で1次ガウス近似法によって防波堤の耐波信頼性の評価が可能であると考えている。

5. あとがき

本研究では、波圧の表式がその大きさによって異なる場合に、条件付確率分布を用いた1次ガウス近似法によって防波堤の安全性指標を計算する方法を提案し、今回は条件付正規分布の仮定のもとではあるが、シミュレーションの結果と比較して、その妥当性を示すことができた。今後、分布形が任意の条件付確率分布で与えられる場合への拡張を予定している。

〈参考文献〉1) 合田 良實：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版社、1997。2) 星谷 勝・石井 清：構造物の信頼性設計、鹿島出版社、1986。3) 小松定夫・中山隆弘：材料強度のばらつきを考慮した定常不規則振動体の初通過破壊確率の研究、土木学会論文報告集、第250号、pp.25-26、1976年6月。

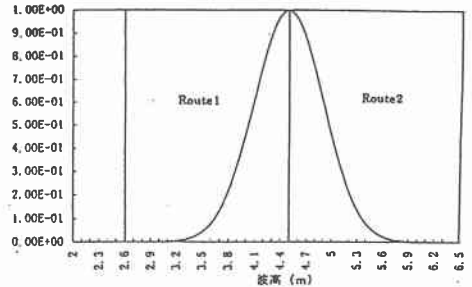


図-2 換算沖波波高の密度関数