

1. はじめに

信頼性設計法は構造物の安全性に関与する荷重や抵抗の諸特性を表わす設計上の全てのパラメーターを確率量として扱い、構造物の安全性の不確実性を定量的に評価しようとするものである。ここでは、現存する既設の防波堤の消波ブロックの安定性について、信頼性設計法による破壊確率 (P_f) と安全性指標 (β) を求めたものである。また、信頼性設計法による P_f と β の算出には、何が主要な確率変数であるかが重要な問題となってくるので、防波堤の消波ブロック重量の算定に用いられるハドソン式から誘導される性能関数の特性に応じた β の変化率、を用いてハドソン式の感度分析を行った。

以上により、実存の防波堤に於ける消波ブロック重量の安定性(過不足)の P_f のオーダー値を示し、さらに、ハドソン式に於ける K_D 値(被覆材および被害率によって定まる定数)について考察を行ったものである。

2. 実存の防波堤の消波ブロック重量

波力を受ける傾斜防波堤構造物の表のり面を被覆する消波ブロックの所要重量を算定するハドソン式は、次のとおりである。

$$W = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{K_D \cdot (S_r - 1)^3 \cdot \cot \alpha}$$

ここに、 W : 消波ブロックの最小重量 (t), H : 設計波高 (m), K_D : 定数, γ_r : ブロックの空中単位体積重量 (t/m³), S_r : ブロックの海水に対する比重, α : 斜面が水平面をなす角 (度)。

実存の防波堤の消波ブロック重量については、以上のハドソン式により、次のように算定されブロック重量が決定されている。算定値に対し余裕を見込んで、25t級消波ブロックが採用されている。

$$W = \frac{2.3 \times 5.3^3}{6.6 \times (2.23 - 1)^3 \times 4/3} = 20.9 \text{ t} < 25.0 \text{ t}$$

3. 破壊確率 (P_f) と安全性指標 (β) の算出

P_f と β の算出には、信頼性設計法で用いられる一次ガウス近似法によった。一次ガウス近似法は成書に譲るとして¹⁾、ハドソン式による消波ブロック重量の過不足(安定性)の算定に関与する全てのパラメーターを確率量として取り扱い、構造物の安全性の不確実性を定量的に評価しようとするものである。ここでは、 H , K_D , W を確率変数として、 γ_r , S_r , α を確定量として取り扱った。信頼性設計法では、 X_i を構造物の破壊現象に関与する設計変数でかつバラツキを有する確率変数として性能関数を次の式のように、 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ と表わし、これより、構造物が対象とする破壊現象に対して安全であるということは、 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0$ と表わすこととしている。従って、ハドソン式から誘導される性能関数は、 $Z = g(H, K_D, W)$ となり他のパラメーターを確定量 ($\gamma_r = 2.3$, $S_r = 2.23$, $\cot \alpha = 1.33$) とすると、消波ブロック重量の安全性を議論する性能関数は次のように表わされることになる。

$$Z = X(1) - \frac{0.927 \times X(2)^3}{X(3)}$$

ここに、 $X(1)$: 確率変数としての W , $X(2)$: 確率変数としての H , $X(3)$: 確率変数としての K_D 。

各々の確率変数の分布形と各々の確率変数のバラツキを表わす平均値と標準偏差については、適宜、仮定して P_f と β の算出を行った。

4. 安全性指標 (β) の変化率 ($\Delta \beta$) を用いた感度分析

P_f と β の算出には、一般に多数の確率変数を取り扱うこととなる。各確率変数の統計量のうち、平均値はともかく、バラツキの分布形や標準偏差を特定することは困難である。確率変数としての消波ブロック重量 W と設計波高 H とは、測定や観測結果から統計量が求められるかも知れないが、未知のパラメーターである K_D の統計量を求めることは不可能である。感度分析は各確率変数のバラツキを

考慮した場合としない場合で、 β にどの程度の差が生じるかにより評価することにした。

各確率変数 W , H , K_D が全てバラツキを有する場合と、各々のうち1変数だけがバラツキが無い(つまり確定量)場合の β を各々求め、その変化率 ($\Delta\beta$) により各確率変数の感度の大小を評価する。

β の変化率を表わす式は次のとおりである。

$$\Delta\beta = \left| \frac{\beta - \beta'}{\beta} \right| \times 100 (\%)$$

ここに、 β : 各確率変数の全てのバラツキを考慮した安全性指標、 β' : 1つの確率変数のみを確定量とした場合の安全性指標。

5. P_f と β の算出結果および感度分析結果

Z を破壊モードの性能関数とする時、 P_f と β は $P_f = 1 - \Phi(\beta) = 1 - \Phi(\mu_z / \sigma_z)$ で表わされる。ここで μ_z と σ_z は各々 Z の平均値および標準偏差であり、 $\Phi(\cdot)$ は平均値0、標準偏差1の標準正規確率分布関数である。

図-1、表-1、表-2、図-2では W , H , K_D を確率変数とし、各々の分布形を ($W = \text{NOR}$, $H = \text{LOG}$, $K_D = \text{GUM}$.) と (W , H , $K_D = \text{NOR}$.) の2ケース、図-3では確率変数を H , K_D として分布形を ($H = \text{LOG}$, $K_D = \text{GUM}$.) と (H , $K_D = \text{NOR}$.) の2ケース、図-4では (H , $K_D = \text{NOR}$.) と仮定して、それぞれ P_f , β , $\Delta\beta$ を算出した。

図-1は構造物の重要度 (P_f が小さい領域) が大きい領域では確率変数の分布形が重要な要素となることを示している。表-1、表-2、図-2は W を確定量として取り扱う必要があり、特に K_D は P_f , β に大きく影響することを示す。図-3は W を確定量とした場合、高波浪時には消波ブロックの安全性は、 $P_f \approx 1 \sim 2 \times 10^{-1}$ であり、 $H = 5.3\text{m}$ をほぼ50年確率設計波高と考えれば、安全性の年破壊確率は、 $P_f \approx 2 \sim 4 \times 10^{-3}$ と考えられる。図-4は、確率変数を H と K_D の二つとした場合の、 W をパラメータとする感度分析結果である。この図も K_D を確率変数として取り扱うべきことを示している。

6. おわりに

実存の防波堤の消波ブロック重量の安定性に係わる高波浪時の破壊確率は、 $P_f \approx 1 \sim 2 \times 10^{-1}$ のオーダーであること、感度分析の結果、消波ブロック重量は確定量として、設計波高と K_D は確定量としてでなく確率変数として取り扱うべきであることが分った。今後、確率変数の分布形の合理的設定と、信頼性設計法による合理的な消波ブロック重量の算定等について検討したい。

〈参考文献〉

- 1) 星谷 勝・石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986。
- 2) 山本正明ほか：土質データーのばらつきと設計，土質工学会誌，土と基礎，1987，Vol 35，No. 8。

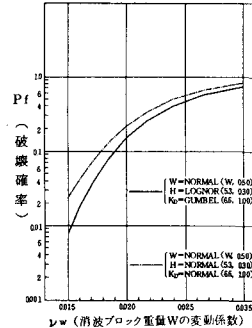


図-1 P_f と W との関係

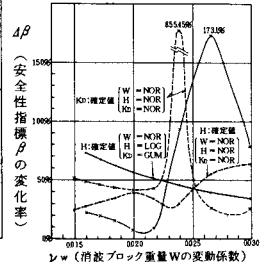


図-2 $\Delta\beta$ と W との関係

表-1 安全性指標の変化率 $\Delta\beta$ の感度

確率変数の分布形	W (消波ブロック重量)	$\Delta\beta$ の変化率		
		大	中	小
16721, 0.50	K_D, H	$\Delta\beta \approx 1.0\%$	$\Delta\beta \approx 1.0\%$	$\Delta\beta \approx 1.0\%$
18811, 0.50	K_D, H	—	—	W
20901, 0.50	K_D, H	—	—	W
22991, 0.50	H	—	K_D	W
25081, 0.50	H	—	K_D	W
27171, 0.50	H, K_D	—	—	W
29261, 0.50	H, K_D	—	—	W
31351, 0.50	H, K_D	—	—	W

確率変数 (W=NORMAL (W, 0.50), H=LOGNOR (H, 0.30), K_D =GUMBEL (K_D, 1.00))

表-2 安全性指標の変化率 $\Delta\beta$ の感度

確率変数の分布形	W (消波ブロック重量)	$\Delta\beta$ の変化率		
		大	中	小
16721, 0.50	H, K_D	—	—	W
18811, 0.50	H, K_D	—	—	W
20901, 0.50	K_D, H	—	—	W
22991, 0.50	H, K_D	—	—	W
25081, 0.50	K_D, H	—	—	W
27171, 0.50	K_D, H	—	—	W
29261, 0.50	K_D, H	—	—	W
31351, 0.50	K_D, H	—	—	W

確率変数 (W=NORMAL (W, 0.50), H=NORMAL (H, 0.50), K_D =NORMAL (K_D, 1.00))

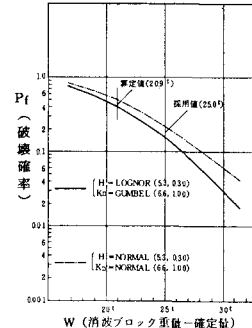


図-3 P_f と W との関係

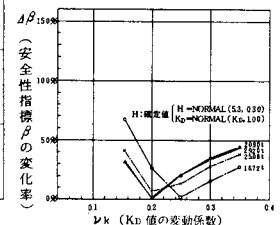


図-4 $\Delta\beta$ と W との関係