

消波工被覆混成堤の信頼性設計

山本方人*・水村和正**・遠藤泰司***

1. ま え が き

現在消波工被覆混成堤の断面設計を行う場合、ケーソンの安定性の検討には安全率法、消波ブロックの安定重量算定にはハドソン式が用いられている。安全率あるいはハドソン式は既設構造物の実績、経験に基づいて設定されたものであるから安全性と経済性を考慮した設計手法であると考えられる。しかしながら安全率は構造物の安全性のレベルを表す尺度ではなく個々の構造物の安定性を示すものであるから、構造物毎に安全性のレベルは異なっている。また最近防波堤が大水深・大波浪域に建設あるいは計画される例が増加しているが、安全率法が経験に基づく以上このような構造物や新しいタイプの構造物の安全性と経済性の両面を満足させることが困難であると考えられる。

以上のような経験に基づいた設計法とは別に統計確率論を基に構造物の信頼度を検討する信頼性理論が土木工学の分野でも展開され、海岸構造物については Van der Meer(1987)、外山(1985)、鈴木(1987)、Mizumura ら(1988)等により傾斜式防波堤、あるいは混成堤などに信頼性理論の適用が試みられている。

信頼性設計では外力や抵抗力などの不確定性を考慮し、構造物の破壊確率を一定値以下にすることが基本となる。一方経済性に関しては、一般的に安全率が大きくなるとイニシャルコストが高くなるが、信頼性設計ではイニシャルコスト、メンテナンス費用、ランニングコストを含めた経済的な評価ができるので最適設計も可能となる(Yamamoto ら, 1988)。このように構造物の信頼性と経済性の両面を考慮できる設計法が将来用いられるものと思われる。

本研究では、信頼性設計の第1歩として消波工被覆混成堤を対象とし、設計条件の変化に対する直立部の滑動と転倒の生起確率の変化を調べた。

2. 直立部の信頼性解析

2.1 信頼性理論

一般に構造物は、構造物の構成部分の破壊モードが順次あるいは同時に進行し、構造物の系全体あるいは構成部分の破壊により構造物の機能が失われる。例えば消波工被覆混成堤の場合、ブロックの飛散・転落・折損が起これ、次に直立部の滑動・転倒が生じ、やがてマウンドからケーソンが転落するなどして防波堤の機能が失われる。

ある破壊モードにおける荷重を S とし、抵抗力を R とすると、次のように破壊基準関数(あるいは性能関数)を定義することができる。

$$Z=R-S \quad (R, S \geq 0) \dots\dots\dots (1)$$

あるいは

$$Z=R/S \quad (R \geq 0, S > 0) \dots\dots\dots (2)$$

(1) 式の場合、 $Z > 0$ であれば破壊は起こらず、 $Z \leq 0$ なら破壊が生じる。(2) 式の場合は、破壊するか否かは $Z=1$ で分けることができる。

一般には R および S は確率変数であるので Z も確率変数となる。 $f(Z)$ を Z の確率密度関数とすると、(1) 式を破壊基準関数とした場合、破壊確率 P は

$$P=\int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \dots\dots\dots (3)$$

と表される。破壊モードが m 個あるとすると、構造成全体の破壊確率 P_f は

$$P_f=Prob\{(Z_1 \leq 0) \cup (Z_2 \leq 0) \cup \dots \cup (Z_m \leq 0)\} \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。各破壊モードが互いに独立であれば、 P_f は(4)式から

$$P_f=1-\prod_{i=1}^m (1-P_{fi}) \dots\dots\dots (5)$$

となる。 P_{fi} は各破壊モードの破壊確率である。したがって、 $Z > 0$ つまり破壊しない確率(信頼度)は

$$P_s=1-P_f \dots\dots\dots (6)$$

で求まる。

2.2 直立部の信頼性解析

消波工被覆防波堤の破壊モードは多数あるが、主なモ

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所

** 正会員 PhD 金沢工業大学教授 土木工学科

*** 正会員 理博 日本テトラポッド(株) 海外コンサルティング事業部

ードを列記すると、①直立部本体の滑動、②直立部本体の転倒、③消波ブロックの移動、④消波ブロックの破損、⑤マウンドの破壊、⑥地盤のすべり破壊などである。③については Mizumura ら(1988) が検討しているので、ここでは①および②について、図-1 に示す防波堤の信頼性の解析を行う。

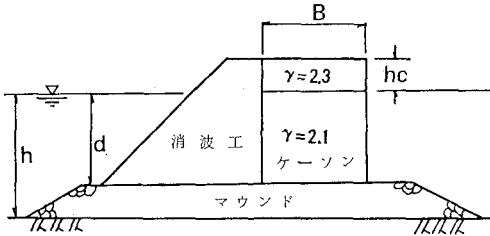


図-1 消波工被覆混成堤のモデル

直立部の滑動に対する耐波安定性の検討には、良く知られているように次式が用いられる。

$$Z_s = \mu(W - U) - F \quad (7)$$

ここで μ : 直立部とマウンド捨石間の摩擦係数、 F : 防波堤直立部に働く水平波力、 U : 揚圧力、 W : 防波堤直立部の水中重量である。 F および U の算定には谷本ら(1976)に従って合田式を準用した波圧算定式を用いる(ただし $\beta=0^\circ$)。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \lambda \alpha_1 w_0 H_s \\ p_3 &= p_u = \lambda \alpha_3 \alpha_s w_0 H_s \\ \gamma^* &= 1.5 \lambda H_s \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4 \pi h/L}{\sinh(4 \pi h/L)} \right]^2 \\ \alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2 \pi h/L)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

であり、 p_1 、 p_3 はそれぞれ静水面および直立部下端での波圧強度、 p_u は底面前趾での揚圧力強度、 λ は消波ブロック被覆による波圧低減率、 w_0 は海水の単位体積重量および H_s は入射波高である。また h は水深、 h' は静水面から直立部底面までの鉛直距離、 L は波長である。静水面から直立部天端までの鉛直距離を h_0 、直立部の幅を B とすると、 F と U は(10)式、(11)式で算定できる。したがって(10)式および(11)式を(7)式に代入すれば、滑動に関する破壊基準関数 Z_s が得られる。

$$F = \frac{h'}{2} (p_1 + p_3) + \frac{h_0 p_1}{2} \times \left(1 + \frac{\gamma^* - h_0}{\gamma^*} \right) \quad (10)$$

$$U = \frac{B}{2} p_u \quad (11)$$

(7) 式で右辺第1項が抵抗力、第2項が荷重項であるから、 $Z_s \leq 0$ の場合に直立部は滑動することになる。

直立部の転倒に関する破壊基準関数 Z_R は

$$Z_R = Wt - M_U - M_p \quad (12)$$

となる。ここで M_p 、 M_U は水平波力、揚圧力の直立部後趾点回りのモーメント、 t は直立部後趾から直立部重量作用点までの距離である。 Z_s と同様に $Z_R \leq 0$ の場合、直立部は転倒する。

破壊基準関数 Z_s 、 Z_R の形からわかるように、本研究では直立部が滑動し始めた時あるいはロッキングが始まる時を破壊と定義したが、ある程度の滑動量やロッキングが許容できる場合などであれば、滑動量やロッキング角度が表現できる破壊基準関数を用いれば良い。

(7) 式～(12) 式において、不確定変数として考えられる物理量は、波高 (H_s)、周期あるいは波長 (L) ケースンとマウンド石間の摩擦係数 (μ)、水深 (潮位を含む、 h)、直立部の重量 (W) それに波圧低減率 (λ) である。これら変数の確率密度関数がわかると各モードの破壊確率が計算できるが、実際には困難である。したがって本研究では次のような仮定を設ける。

① 不確定変数は、波高、周期、摩擦係数、波圧低減率の4種類とし、他の変数は一定とする。

② 沖波波高はレーリー分布に従うものとし、周期はその自乗がレーリー分布に従うものとする。

③ 摩擦係数は直立部の 10 cm 滑動を許容するとして平均値 0.57、標準偏差 0.05 の正規分布とする(外山, 1985)。

④ 波圧低減率は谷本ら(1976)の実験値を参考にして 0.4～1.0 間に一様分布するものとする。

Z_s および Z_R は確率変数であるので、それらの確率密度関数をそれぞれ $f_s(Z_s)$ および $f_R(Z_R)$ とすると、直立部の滑動および転倒の破壊が生起する確率(以降それぞれ P_s 、 P_R と称する)は、(3)式より、

$$P_s = \int_{-\infty}^0 f_s(Z_s) dZ_s \quad (13)$$

$$P_R = \int_{-\infty}^0 f_R(Z_R) dZ_R \quad (14)$$

で与えられる。しかしながら f_s 、 f_R の関数形を求めることは一般に困難であるので、ここではモンテカルロ法によりシミュレーションを行った。

2.3 計算手順

2.2 で述べた波高および周期の分布は沖波でのそれであったが、防波堤の安全性を検討するには、防波堤設置位置での波高が必要になるので、沖波での波高から堤体位置までの波浪変形計算を行わねばならない。ここでは次のようにして堤体位置での波高を求めた。

2.2 の仮定②に示した分布を持つ沖波の波高・周期から1組の波高と周期を抽出し、深海における碎波の有無

をミッセルの式 ((15)式) で判定し,

$$\frac{H}{L_0} = 0.142 \quad \dots\dots\dots (15)$$

砕波する波は計算から除外した。次に堤体設置位置までの波高変化は首藤(1974)の波高変化の式あるいは合田(1973)による次式を用いて計算した。なお周期は変わらないものとし、 $A=1.8$ とした。

$$\frac{H_b}{L_0} = A[1 - \exp\{-1.5 \frac{\pi h}{L_0} \times (1 + 15 \times \tan^{4/3} \theta)\}] \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで H_b は砕波波高である。

このようにして堤体位置における波高と周期が求まるので、これらを(8)~(11)式に代入し、(7)式、(12)式を計算すると、1組の波高・周期に対する破壊基準関数の1つの値が求まる。沖波の分布からランダムに波高・周期の組合わせを抽出し、同様の手順で Z_s と Z_R を計算することにより、 $Z_s \leq 0$, $Z_R \leq 0$ となる確率が求まる。したがって2つの破壊モードの確率から滑動あるいは転倒が生起する確率 P_f は

$$P_f = P_s + P_R - P_s \cdot P_R \quad \dots\dots\dots (17)$$

で得られる。

3. 解析結果

破壊確率の計算は、換算沖波波高 (H'_0)、周期 (T)、直立部の幅 (B) および水深 (h) を変化させて行った。なお、海底勾配は1/100、直立部のうちケーソン部分の空中単位体積重量は 2.1 t/m^3 、上部工のそれは 2.3 t/m^3 とし、静水面から上部工天端までの距離 (h_c) は 2.0 m で一定とした。モンテカルロシミュレーション法の試行回数は、予備計算の結果を基にして5000回とした。

3.1 波高の破壊確率への影響

直立部の幅 (B) = 4.0 m 、堤体位置での水深 (h) = 6.0 m 、マウンド水深 (d) = 4.0 m 、有義波周期 (T) = 8.0 sec で一定とし、換算沖波波高 (H'_0) を変化させて破壊確率を試算した結果を図-2 に示す。

この図には、現設計法による直立部の滑動および転倒に対する安全率 (以降 SF_s , SF_R と書く) も併記した (図中それぞれ実線と破線で示した)。安全率の計算においては波圧低減率 λ は 0.8 とした。

直立部の滑動、転倒が生じる確率 P_s , P_R とそれらのうち一方が生起する確率 P_f は、 H'_0 が大きくなると増加し、 $H'_0 = 7.0 \text{ m}$ で最大となり、 $H'_0 \geq 8.0 \text{ m}$ では砕波の影響で減少している。 SF_s および SF_R の H'_0 に対する変化は単調に減少しており、 H'_0 が大きいほど防波堤直立部はより危険になることを示しているが、本計算では、 $H'_0 = 7.0 \text{ m}$ が最も危険度が高くなる。 P_s と P_R を比べると、 P_s が P_R より大きく、滑動の方が転倒よりも危険であることがわかる。さらに、 P_s の増加率が

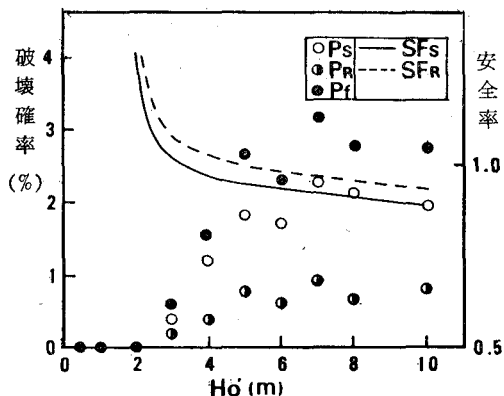


図-2 波高に対する破壊確率の変化

P_R のそれより大きく、波高には滑動に大きな影響を与える。

3.2 周期の破壊確率への影響

堤体条件および水深は 3.1 と同じで、 $H'_0 = 4.0 \text{ m}$ で一定とし、周期を変化させた場合の P_s , P_R , P_f , SF_s , SF_R の変化を図-3 に示す。

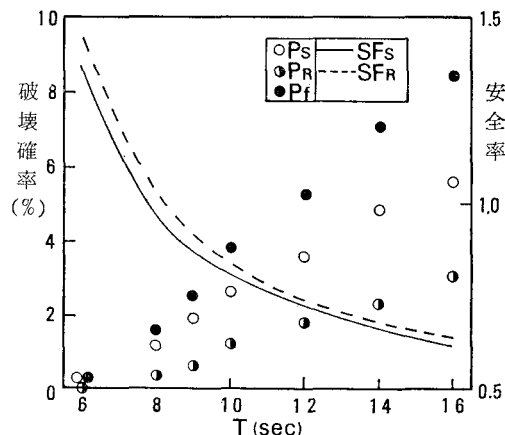
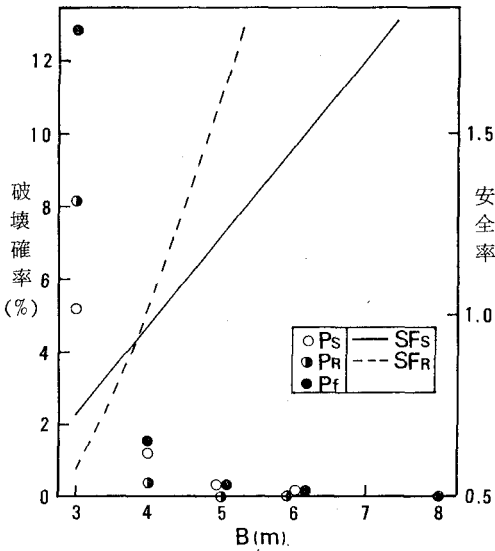
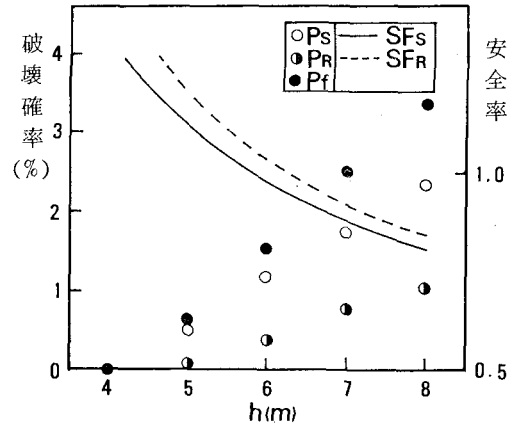


図-3 周期に対する破壊確率の変化

P_s , P_R は周期が長くなると増加しており、 P_f も当然直線的に大きくなっている。安全率は周期が長くなると減少し、破壊確率と同様に波高が同じであれば長周期波ほど防波堤の安全性は悪くなることを示している。 SF_s と SF_R , P_s と P_R の値を比較すれば直立部は転倒より滑動し易いことがわかるが、周期が長くなると SF_s と SF_R の差が小さくなっているのに対し、 P_s と P_R の差は大きくなっている。このことは本計算条件の範囲では入射波の周期が長くなれば、防波堤の直立部が滑動する可能性より一層高くなることを示すものであり、長周期波の場合は、直立部の幅を増すなり、摩擦係数の平均値



図—4 直立部幅に対する破壊確率の変化



図—5 水深に対する破壊確率の変化

を大きくするなどの、転倒よりも滑動対策が重要になると考えられる。

3.3 堤体幅の破壊確率への影響

$H_0'=4.0\text{ m}$, $T=8.0\text{ sec}$, $h=4.0\text{ m}$ で一定とし、堤体幅 (B) を変化させた場合の破壊確率と安全率を図—4 に示す。

P_s , P_R , P_f 共に $B=3.0\text{ m}$ の場合が最も大きく、堤体幅が 4 m になると各破壊確率は急激に減少し 2% 以下となり、さらに $B=7.0\text{ m}$ では各破壊確率は 0 となっている。 $B=3.0\text{ m}$ の場合は堤体幅が狭いので、 P_R の値は P_s より大きく、直立部は滑動より転倒する可能性の方が高い。 $B \geq 4.0\text{ m}$ の範囲では、逆に P_s が大きくなっている。これは安全率の変化からもわかることである。

3.4 水深の破壊確率への影響

$H_0'=4\text{ m}$, $T=8.0\text{ sec}$, $d=4.0\text{ m}$ で固定し、水深 (h) を変化させ、破壊確率と安全率を計算したものが図—5 である。

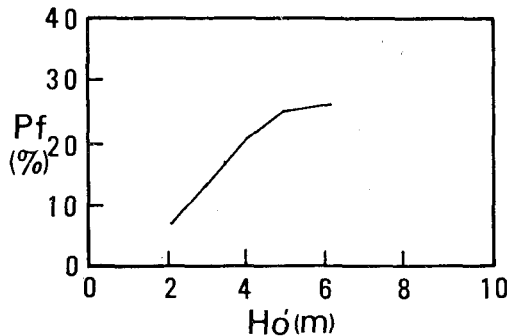
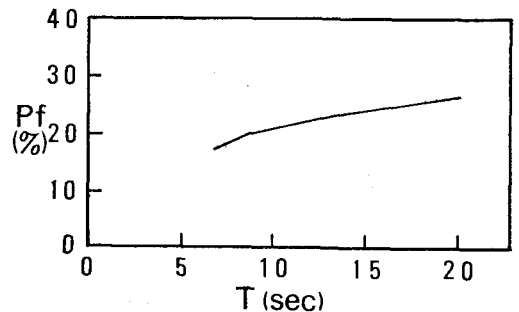
$h=4.0\text{ m}$ で、 P_s , P_R は共に 0 であるが、これは碎波のため、堤体に作用する波の波高が小さくなったからであり、 h が大きくなると、堤体には減衰の少ない波が作用するので破壊確率は大きくなる。安全率は h の増加と共に減少しており、 P_s , P_R と同様の傾向であるが、 $h=8.0\text{ m}$ では SF_s と SF_R がほとんど同じ値となるのに対し、 P_s は P_R より大きな値である。このことは防波堤の安全性の評価を安全率で行うと、滑動と転倒のうちどちらがより危険かは明らかにできないが、本計算手法を用いると滑動の可能性が転倒のそれより高いということになる。

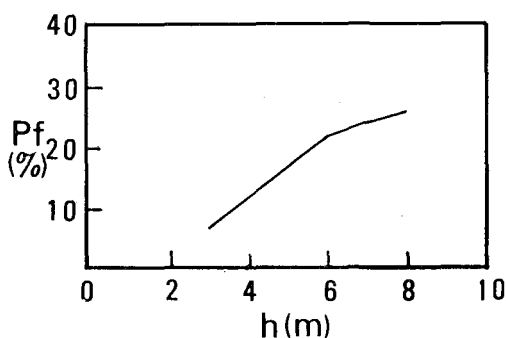
図—2～図—5 よりわかるように安全率が 1.0 以下であ

っても破壊確率は数%である。 P_f の許容値をいくらにするかという問題はあるが、安全率法で防波堤の安定を検討すると、安全率が 1.0 以下の防波堤は設計波相当の波が作用する場合には必ず滑動などの破壊が起こることになるが、信頼性理論を用いると必ずしも破壊が起こるとは限らないという結果になる。

3.5 消波工の破壊確率と直立部の破壊確率

Mizumuraら(1988)は消波ブロックの滑動、ロッキング

図—6 H_0' と P_f の関係図—7 T と P_f の関係

図-8 h と P_f の関係

グおよび浮き上がりを破壊モードとして抽出し、それらが生起する確率を求めており、図-6~8 はその結果である。

消波ブロックはテトラポッドであり、 $H_0'=4\text{m}$ 、法面勾配が $1:4/3$ 、 $K_d=8.3$ の条件で、ハドソン式を用いて求まるテトラポッド 8t 型の破壊確率を波高、周期および法先水深を変化させて計算したものである。

図-6~8 と図-2, 3, 5 を比較すると、 H_0' 、 T 、 h の変化に対する消波ブロックと直立部の破壊確率の変化は同じような傾向を示しているが、同一条件下では消波ブロックの破壊確率が高い。このことは破壊基準関数の決め方にもよるが、消波工被覆混成堤は消波工部分から破壊することを示唆するものと言えよう。このように防波堤を構成する部分により破壊確率が異なることは設計の際注意する必要があると思われる。

4. あとがき

消波工被覆混成堤直立部の滑動および転倒の生起確率を求め、それらの入射波高、周期、水深、直立部の幅に対する変化を調べた。破壊確率の H_0' 、 T 、 h 、 B に対

する変化は全体的には安全率の変化の傾向に似ており、信頼性設計は防波堤にも適用可能なものと考えられる。

安全率法により消波工被覆混成堤の滑動、転倒を検討する場合、設計波は最大波を採用し、安全率は 1.2 以上とするのが通常であり、安全率が 1.0 以下であると 100% 滑動あるいは転倒すると判断される。一方信頼性理論によると、安全率が 1.2 以上では破壊確率は 0 となり、滑動も転倒も起こらないが、安全率が 1.0 以下であっても滑動あるいは転倒するとは限らないという結果になり、直立部断面を小さくすることが可能になると考えられる。しかしながら、現段階では破壊確率の許容値の問題があり、大きな課題となっている。今後は破壊確率の許容値に加え、波の統計的変動性、基礎地盤、コンクリート強度、マウンドの支持力、経済性などを含む防波堤の系全体の信頼性設計手法の検討を順次行う所存である。

参 考 文 献

- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 31~69.
- 首藤伸夫 (1974): 非線型長波の変形—水路幅、水深の変化する場合—, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 57~63.
- 鈴木慎也 (1987): 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用(その 2), 港研資料, No. 582, 37 p.
- 谷本勝利・本 浩司・石塚修次・合田良実 (1976): 防波堤の設計波力算定式についての検討, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 11~16.
- 外山進一 (1985): 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用, 港研資料, No. 540, 49 p.
- Mizumura, K., M. Yamamoto, T. Endo and N. Shiraishi (1988): Reliability analysis of rubble-mound breakwater, ICCE, Vol. 3, pp. 2053~2062.
- Van der Meer, J. W. and K. W. Pilarczyk (1987): Stability of breakwater armour layers deterministic and probabilistic design, Delft Hydraulic Communication, No. 378, 34 p.
- Yamamoto, M., K. Mizumura, T. Endo and N. Shiraishi (1988): Reliability based design of rubble-mound breakwater, Proc. 21st ICCE, Vol. 3, pp. 2063~2074.