

# 信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性確率評価に関する研究

## Reliability Analysis of Failure Probability of Wave-Dissipating Blocks

間瀬 肇<sup>1</sup>・高橋真弘<sup>2</sup>・安田誠宏<sup>3</sup>・森 信人<sup>4</sup>

Hajime MASE, Masahiro TAKAHASHI, Tomohiro YASUDA and Nobuhito MORI

The probability of failure due to armour layer instability was estimated using a reliability software package which employs the Level II First Order Reliability Method (FORM). The stability of concrete blocks was investigated and the stability formulae taking into account the effects of wave steepness and wave breaking were used in the reliability analysis. The sensitivity of the performance function to external random variables was examined in order to establish the relative importance of variables influencing the failure probabilities.

### 1. はじめに

消波ブロック被覆堤は、波力、反射率、越波流量の低減効果を図った、わが国特有の防波堤である。これは、西洋における被覆石やブロック外層を有する傾斜堤に対応する。こうした消波ブロックの安定質量算定式が幾つか提案されているが、ブロック形状は様々で、水理実験や数値流体解析によって一般的な算定式を確立することは困難であり、現在でも盛んに研究が行われている。近年の防波堤の大水深化や設計波の見直しに伴った設計波の高波高化により大きな所要質量が必要となるが、経済的観点からは、所要質量はできる限り小さい方がよい。したがって、消波ブロックの耐波安定性をより正確に評価することが重要である。

安全性と機能性を十分に確保するためには、荷重と構造系に介在する様々な不確定要因を、合理的かつ定量的に取り扱える算定手法に基づいた設計法が必要である。このような背景から発展して現在に至った設計法が信頼性設計法であり、「終局強度限界状態および使用限界状態の発生確率を一定値以内におさえること」に基づく設計法である。

本研究は、間瀬ら(2007)に習い、信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性評価法を提案するものであり、被災確率に及ぼす不確定外力や安定質量算定式の不確定性の影響を検討する。被災確率算定図からはブロックの代表径を決定することができる。性能関数(以下では被災率評価関数と称する)を規定するにあたっては、水理実験より定式化した、ある特定の消波ブロックに対して得られた安定数算定式を用いる。

### 2. 信頼性設計

信頼性設計では構造物の各破壊モードを抽出し、それぞれのモードに関する破壊確率を算出する。各破壊モードについての破壊確率の計算にあたっては、被災率評価関数によって、抵抗力と作用力の差、あるいは、比率として表す。信頼性設計には設計水準レベルⅢ、ⅡおよびⅠの3つのレベルの設計法がある。

レベルⅢは、破壊モードに対する破壊確率を正しく求めようとするもので、不確定要因の統計的特性やパラメータがすべて既知であるとした上で、モンテカルロ法によって生起確率を直接計算する。レベルⅡでは、被災率評価関数の平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ から求められる安全性指標 $\beta_z = \mu/\sigma$ を用いて信頼度を確保する。レベルⅠでは、被災率評価関数に含まれる種々の確率変数に対して、公称値に対する部分安全係数を定めて、バランスのとれた許容応力設計を行うものである。

設計水準レベルⅡにおける、破壊モードの生起確率を算定するための方法の1つとして1次ガウス近似法がある。不確定要因のうち、正規確率分布以外のものに対しては、破壊点において確率密度と累積確率値が等しくなる正規確率密度関数で近似する。互いに相関をもつ確率変数については、共分散マトリクスを考え、固有値問題を解くことによって各共分散値が0になる確率変数に変換しておく。

破壊モード*i*の被災率評価関数を $Z_i = g_i(x_1, \dots, x_n)$ 、破壊点を $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ とする。ここで、 $x_j$ は外力要素である。 $x^*$ は、以下の連立方程式を解くことで得られる。

$$g_i(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$x_j^* = \mu_{x_j} - \alpha_j \left( \frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}} \right) \sigma_{x_j}; j=1, 2, \dots, n \dots\dots\dots (2)$$

1 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
2 修(工) 関西電力株式会社  
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所  
4 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所

$$\alpha_j = \frac{\left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \sigma_{X_j}}{\left\{ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right)^2 \sigma_{X_j}^2 \right\}^{1/2}}; j=1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\mu_{Z_i}$ 、 $\sigma_{Z_i}$ 、 $\mu_{X_i}$ 、 $\sigma_{X_i}$  はそれぞれ性能関数 $Z_i$ の平均値と分散、および外力確率変数 $X_j$ の平均値と分散である。破壊確率 $P_f$ は次式で求められる。

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Z_i}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}}\right)^2} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy$$

$$= \Phi\left(-\frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{Z_i}}{\sigma_{Z_i}}\right) = 1 - \Phi(\beta_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\Phi$ は平均値0、標準偏差1の標準正規分布である。式(3)は以下のように変形される。

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\left( \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \sigma_{X_j}}{\sigma_{Z_i}} \right\}^2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

これは、 $\alpha_j^2$ が $\sigma_{Z_i}$ に対する外力確率変数 $X_j$ の分散 $\sigma_{X_j}$ の寄与率を表している。

### 3. 消波ブロックの安定数算定式

安田ら(2009)は、水理模型実験により消波ブロックの耐波安定性を調べ、以下の結果を得た。i) 通常の設計波浪の波形勾配0.02~0.04の範囲では、安定数にはその影響はあまりないとされているが、碎波が生じない場合にその影響がないことがわかった。ii) 碎波条件においては、波形勾配の影響が表れるが、これは碎波形態に関連する沖波波形勾配の影響である。そこで、碎波条件での安定数算定式に、沖波波形勾配と海底勾配により定まる碎波形態の影響を取り込んだ。iii) 消波ブロックの安定数算定式を提案するにあたり、非碎波条件および碎波条件に分けて、また、従来用いられているべき乗関数および新たに指数関数の2種類の算定式を提案した。

べき乗関数で非碎波条件の場合：

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = 2.46(N_{od} / N^{0.5})^{0.2} + 1.38 \quad \dots\dots\dots (6)$$

べき乗関数で碎波条件  $1.5 < h/H_0 < 2.5$  の場合：

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = a(N_{od} / N^{0.5})^c + b \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$a = \frac{H_0 / L_0 + 1.85 \tan \beta + 0.0364}{0.883 \tan \beta + 0.0175} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$b = \frac{H_0 / L_0 + 1.79 \tan \beta + 0.0352}{1.51 \tan \beta + 0.0300} \quad \dots\dots\dots (9)$$

指数関数で非碎波条件の場合：

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = -1.80 \exp \{-14.0(N_{od} / N^{0.5})\} + 3.50 \quad \dots\dots\dots (10)$$

指数関数で碎波条件  $1.5 < h/H_0 < 2.5$  の場合：

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = d \exp \{f(N_{od} / N^{0.5})\} + e \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$d = \frac{H_0 / L_0 + 0.415 \tan \beta + 0.00796}{-0.552 \tan \beta - 0.0109} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$e = \frac{H_0 / L_0 + 1.43 \tan \beta + 0.0281}{0.558 \tan \beta + 0.0111} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$f = \frac{H_0 / L_0 - 1.50 \tan \beta - 0.0303}{0.0279 \tan \beta + 0.000553} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $H_{1/3}$ は入射有義波高、 $S_r$ はコンクリートブロックの海水に対する相対比重、 $D_n$ はブロックの代表径、 $N_{od}$ はブロックの代表径幅の断面内におけるブロックの移動個数として定義される被災度である。 $N_s$ は安定数と呼ばれる。また、 $H_0/L_0$ は沖波波形勾配、 $\tan\beta$ は海底勾配である。

図-1は、安定数に関する実験結果と算定式について全体の傾向を示したもので、また、図-2は、実験値と算定値を直接比較したものであり、それぞれの図の(a)はべき乗関数、(b)は指数関数を用いた場合の結果である。算定値と実験値との相関係数は、べき乗関数を用いた場合には0.90、指数関数を用いた場合は0.95であり、指数関数の方が整合性がより高いことがわかった。

### 4. 耐波安定性の信頼性解析

#### (1) 性能関数と外力変数

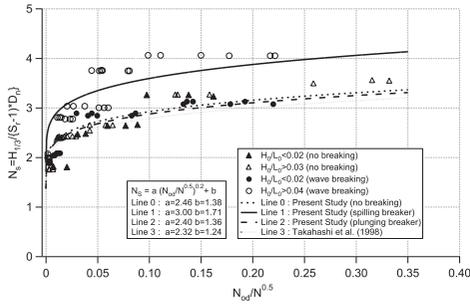
ここでは、安定数算定式として、主として指数関数を用いた結果を載せるが、べき乗関数を用いた結果との相違も適宜述べる。

被災率評価関数は、許容被災度と代表径 $D_n$ のブロックの被災度との差と定義した。指数関数を用いた場合は、式(11)より、以下のように表わされる。

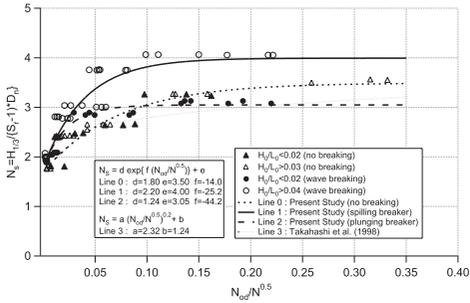
$$Z = N_{od} - \frac{N^{0.5}}{f} \ln \left\{ \frac{H_s}{Err(S_r - 1)D_n d} - \frac{e}{d} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、上式には安定数算定式による算定値に真値との誤差があるとして、算定値に対する真値の比を $Err$ として取り入れてある。実際の設計では、対象構造物固有の許容値を適切に設定することが必要である。本研究では、様々な状況での被災確率特性および不確定要因の影響を検討することが目的であるため、許容被災度として、高橋ら(1998)が推奨している0.3、Shore Protection Manual(1984)に記載されている2種類の基準値1.0および2.0の3種類を用いる。

被災度に影響を及ぼす不確定要因としては、有義波高、



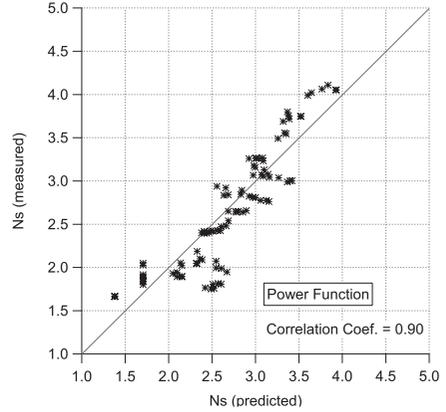
(a) べき乗関数算定式



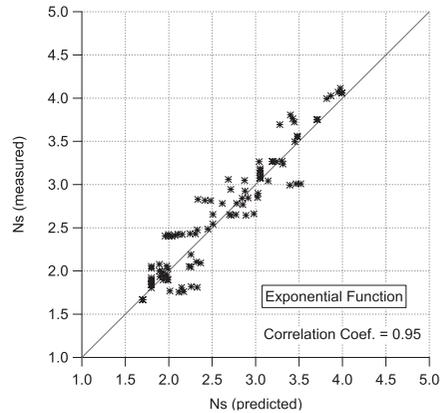
(b) 指数関数算定式

図-1 安定数と被災度に関する実験結果と算定式の関係

沖波波形勾配, 波数, 海底勾配および安定数算定値そのものの不確定性の5種類を考慮した. 表-1に, 各不確定要因の確率分布, 平均値, 標準偏差, 上限値, 下限値を示す. ただし, 海底勾配の誤差はわずかであるとした. ここでは, 有義波高分布について, 2ケースを想定した. 1つは毎時間観測から得られる有義波高分布であり, Weibull分布を仮定した. もう1つは, 設計波 (例えば, 50年再現確率波) の推定誤差分布である. 間瀬ら (2000) は, 資料年数, 平均発生率, 母集団の極値分布関数, 再現期間を変化させた場合に, 確率波高に関する真値と推定値の誤差分布特性がどのようになるかを検討し, 推定波



(a) べき乗関数算定式



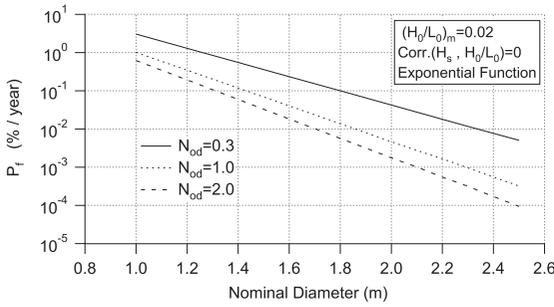
(b) 指数関数算定式

図-2 安定数に関する実験値と算定値の比較

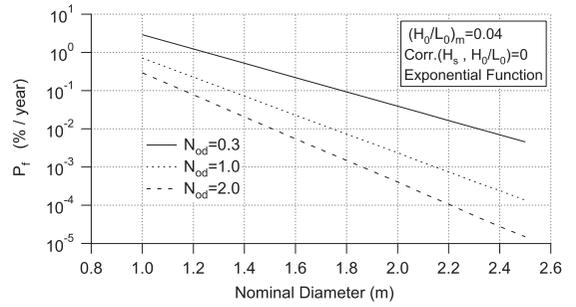
高と真値との誤差分布がかなり普遍的にGumbel分布で近似できることを示した. この結果を用いて, 設計波高の誤差分布をGumbel分布とした. 安定数算定式の算定誤差分布には, 上限と下限を設定できるBeta分布を用い

表-1 不確定要因の確率特性

| 変数                   | 確率分布の種類   | $\mu$  | $\sigma$              | $x_1, x_2$                  |
|----------------------|-----------|--------|-----------------------|-----------------------------|
| 有義波高 ( $H_{1/3}$ )   | Weibull分布 | 1.2    | 0.7                   | $x_1 = 0.45$                |
|                      | Gumbel分布  | 7.45   | 1.0                   |                             |
| 海底勾配 ( $\tan\beta$ ) | Normal分布  | 0.0333 | ほぼ一定値とみなすため<br>0.0001 |                             |
| 沖波波形勾配 ( $H_0/L_0$ ) | Normal分布  | 0.02   | 0.00102               | 0.02以下は0.02とみなす             |
|                      |           | 0.03   | 0.00153               |                             |
|                      |           | 0.04   | 0.00204               | 0.04以上は0.04とみなす             |
| 波数 ( $N$ )           | Beta分布    | 800    | 100                   | $x_1 = 400$<br>$x_2 = 1600$ |
|                      |           | 1000   | 150                   | $x_1 = 400$<br>$x_2 = 3000$ |
| 算定式自体の不確実性 ( $Err$ ) | Beta分布    | 1.0    | 0.1                   | $x_1 = 0.8$<br>$x_2 = 1.2$  |

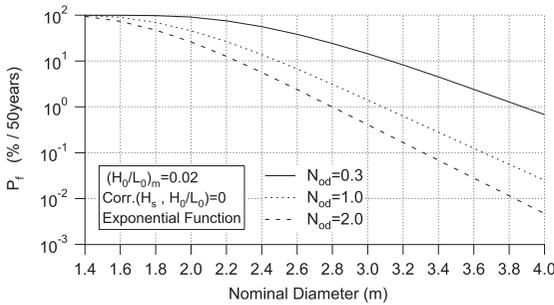


(a)  $H_0/L_0=0.02$

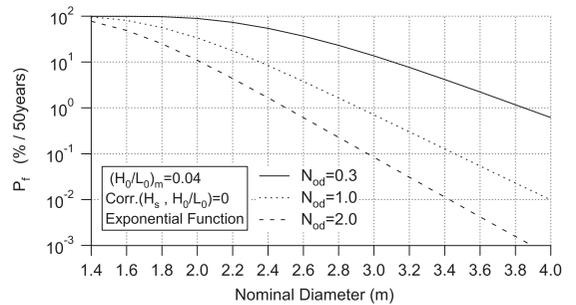


(b)  $H_0/L_0=0.04$

図-3 ブロックの代表径に対する年被災確率



(a)  $H_0/L_0=0.02$



(b)  $H_0/L_0=0.04$

図-4 ブロックの代表径に対する50年被災確率

た。その他、入射有義波高と沖波波形勾配の間に相関がある場合も想定し、両者の相関係数を0.7とした条件についても解析を行った。また、解析にはReis (1998)のプログラムを用いた。

(2) 解析結果

ブロック代表径に対して年被災確率 $P_f$ を算出し、図-3に示す。ただし、全ての変数が独立である場合の結果である。パラメータは、許容被災度が0.3、1.0および2.0である。これらの図から、許容被災度 $N_{od}$ が大きくなるほど、ブロック代表径が大きくなるほど $P_f$ が減少すること、また同じ条件に対しては波形勾配が大きいと $P_f$ が小さくなることわかる。その他、沖波波形勾配と入射有義波高との相関を考慮した結果との差は非常に小さいこと、指数関数とべき乗関数を用いた時の差異は特に $N_{od}$ が小さい時に現れることがわかった。

図-4は、50年再現確率波高の推定誤差を考慮した時の50年被災確率の算定結果を示したものである。図の整理方法は、図-3のそれと同様である。沖波波形勾配が大きいほど、代表径が大きいほど、 $P_f$ は小さくなる。また、許容被災度の値によって、指数関数型あるいはべき乗関数型安定数算定式を用いるかによって、被害率の値が異なる。

図-5は、許容被災度が1.0の場合に異なる安定数算定式

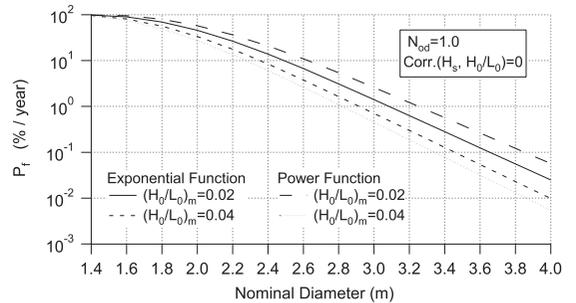


図-5 許容被災度が1.0の場合の安定数算定式の相違によるブロックの代表径に対する50年被災確率

によって算定した被災率である。オーダー的にはあまり変わらないが、算定式によって差があるのがわかる。許容被災度を0.3とした場合では、どの沖波波形勾配についても指数関数型の算定式の方が、べき乗関数型の算定式に比べて被災確率を大きく算定した。これに対して、許容被災度を1.0とした場合については、どの沖波波形勾配についてもべき乗関数型の算定式の方が、指数関数型の算定式に比べて被災確率を大きく算定した。

(3) 不確定要因の影響度評価

被災確率に寄与する各不確定要因の影響度は、レベルII解析においては $\alpha^2$ 値で評価することができる。そこで、

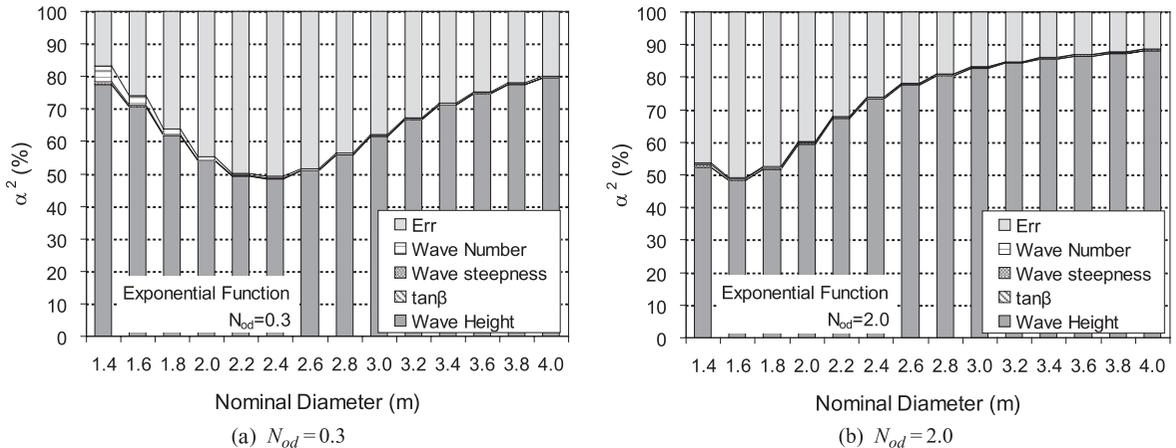


図-6 50年被災率評価関数の分散に対する各外力要因の寄与率

50年被災率算出時に得られる各不確定要因の $\alpha^2$ 値を算出した。図-6より、50年被災率に寄与する影響度は有義波高がいずれの場合においても高く、第2位に算定式自体の不確実性による影響が大きいという事がわかる。また図より、許容被災度が0.3の場合には、ブロック代表径が2.4mで算定式の誤差の影響が最も大きく、許容被災度が2.0と大きくなると、ブロック代表径が1.6mと小さい場合に算定誤差の影響が大きくなるといった変化がわかる。

本研究では、安田ら(2009)の安定数算定公式を利用して、また、外力はおおよそ観測結果を参考にして決めた条件のもとで被災率を算定し、その値および外力の影響度を解析する手段を示した。このプロセスは新たな消波ブロックに対する算定式とその誤差を設定することにより、一般的に適用可能である。特に、外力要因の感度を分析することにより、どの要因の変動特性をきっちり把握しなければならないかを明確にすることができる。

## 5. まとめ

本研究は、信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性評価法を提案したものである。本手法に基づけば、被災率算定図からブロックの代表径を決定することができる。被災率評価関数は、許容被災度から所定のブロック代表径に対する被災度推定値を差し引いたものとして定義した。

その際、安定数算定式による算定値には真値との誤差があるとして、算定値に対する真値の比の平均値は1.0および誤差は20%以内となるBeta分布を仮定した。許容被災度は、0.3、1.0および2.0の3種類とした。

このような条件のもとで、年被災率あるいは50年被災

率を算定する方法を示した。許容被災度が大きくなるほど、ブロック代表径が大きくなるほど年被災率が減少すること、沖波波形勾配と入射有義波高との相関を考慮した結果との差は非常に小さいこと、指数関数とべき乗関数を用いた時の差異は許容被災度に依存して現れることがわかった。

レベルII解析においては被災率に寄与する各不確定要因の影響度を容易に調べることができ、構造物に作用する種々の外力の中でどの要因の変動特性を詳細に把握しなければならないかを明確にすることができる。したがって、海岸海洋構造物の設計に当たって、レベルII解析の有用性を利用した研究が重要である。

## 参考文献

- 高橋重雄, 半沢 稔, 佐藤弘和, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内 潔, 高山知司, 谷本勝利 (1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量-消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第1報-, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp.3-32.
- 間瀬 肇・北野利一・森岡智史 (2000): 波浪極値統計解析における一般化パレート分布の適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.221-225.
- 間瀬 肇・高橋真弘・安田誠宏・Maria T. Reis・Terry S. Hedges (2007): 信頼性解析による越波流量の許容値超過率評価および護岸天端高の設定方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.891-895.
- 安田誠宏・間瀬 肇・松下紘資・徳永誠之 (2009): 波形勾配および砕波の影響を考慮した消波ブロック安定数算定式の提案, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.575-580.
- Reis, M.T. (1998): Probabilistic assessment of the safety of coastal structures, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK, 603p.
- Shore Protection Manual (1984): 4th ed. by U.S. Army Engineer Waterways Exp. Station, Washington, DC.