

信頼性解析による越波流量の許容値超過確率評価および 護岸天端高の設定方法に関する研究

Exceedance Probability Assessment of Permissible Wave Overtopping and
Design of Seawall Freeboard by Reliability Analysis

間瀬 肇¹・高橋真弘²・安田誠宏³・Maria T. Reis⁴・Terry S. Hedges⁵

Hajime MASE, Masahiro TAKAHASHI, Tomohiro YASUDA, Maria T. REIS
and Terry S. HEDGES

This paper uses reliability analysis to estimate the failure probabilities associated with wave overtopping of both sloping and vertical seawalls. Failure probabilities are obtained for different freeboards and permissible overtopping rates, using Monte Carlo simulation for calculations at Level III and the First Order Reliability Method for Level II calculations. The sensitivity of the performance function to the various external random variables is also investigated in order to establish the relative importance of these variables in influencing the failure probabilities.

1. はじめに

構造物の設計に当っては、土木、建築、その他の分野を問わず、その構造物の供用期間において、安全性と機能性を十分に確保することが必要である。また近年、無駄をなくした最小費用となる設計、すなわち、経済性、使用快適性、構造物の美観や周囲環境との調和等も考慮した設計が要求されている。

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。

海岸工学の分野では、河合ら (1997) による潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率に関する研究、長尾ら (2005) による越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究等が行われている。本研究は、不確定要因を確率論的に取り扱うことができ、合理的な設計が可能となる信頼性設計法に基づき、傾斜護岸および直立護岸の許容越波流量を超過する確率の評価を行うものである。ここでは信頼性解析法におけるレベル II およびレベル III の設計水準に基づいた被災確率の比

較を行い、その相違を見る。また、被災確率に及ぼす不確定外力要因の影響度の検討方法を示す。最後に、護岸天端高の設定方法を提案する。

2. 信頼性設計法

信頼性設計法では、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。破壊モードの抽出には、蓄積された経験やシステム分析手法が用いられる。各破壊モードについての破壊確率の計算にあたっては、破壊モードを規定する算定式が必要である。その算定式は性能関数、機能評価関数、あるいは破壊基準関数などと呼ばれる (抵抗力と作用力の差などとして表される)。

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 水準は、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、生起確率を直接計算する。レベル II 水準では、性能関数の平均値 μ と標準偏差 σ から求められる安全性指標 ($\beta = \mu/\sigma$) を用いて信頼度を評価する。信頼性解析レベル I では、性能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、破壊モードに対する信頼度を評価する。

設計水準レベル III で使われるモンテカルロ法では、各変数がとりうる値の組合せの非常に多くの試行数に対して、性能関数が負となる個数を算出して破壊確率を評価する。モンテカルロ法の長所は、確率変数のサンプルを用い、既存の開発プログラムと組み合わせて破壊モードの生起確率を容易に求めることができる、確率変数の数が多く性能関数が複雑で理論解を求めることが困難な場

1 正 会 員	工博	京都大学教授 防災研究所
2 学生会員		京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻
3 正 会 員	博(工)	京都大学助教 防災研究所
4	PhD	ポルトガル国立土木研究所
5	Eur Ing	英国リバプール大学工学部

合でも適用できることである。欠点の1つは、パラメータ等を変更する毎にシミュレーションをやり直す必要があり、解の一般化には向いていないことである。

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。ここでは、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*に対する性能関数を $Z_i = g_i(x_1, \dots, x_n)$ 、破壊点を x^* とする。破壊点は、以下に示す連立方程式を解くことで得られる。

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

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

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

ここで、 μ_{Z_i} 、 σ_{Z_i} 、 μ_{x_j} 、 σ_{x_j} 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。

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

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

Φ は平均値0、標準偏差1の標準正規分布である。

式(3)より以下の式が得られる。

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right) \sigma_{x_j}}{\sigma_{Z_i}} \right\}^2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j^2 = 1 \quad (5)$$

式(5)より、 α_j^2 は σ_{Z_i} に対する外力確率変数 x_j の分散 σ_{x_j} の寄与率を表している。

3. 越波流量の許容値超過確率の評価

(1) 解析条件

解析条件として、英国リバプール湾に設置される仮想の護岸を取り上げる。対象とする護岸は、図-1に示す、勾配が1:2の傾斜護岸および直立護岸である。護岸の法先は OD=0m (OD: Ordnance Datum) に位置するものとする。前面の海底勾配は1:30とする。

傾斜護岸に対する越波流量算定式は、Hedges and

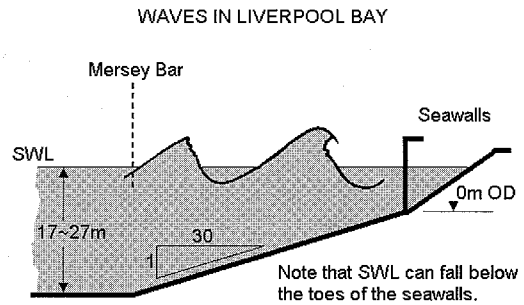


図-1 仮想護岸設置位置における断面図

Reis (1998) が提案した以下の式を用いる。

$$q^* = \begin{cases} A(1-R^*)^B & \text{for } 0 \leq R^* < 1 \\ 0 & \text{for } 1 \leq R^* \end{cases} \quad (6)$$

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{g(CH_s)^3}} = \frac{q}{\sqrt{gR_{\max}^3}} \quad (7)$$

$$R^* = \frac{R_c}{CH_s} = \frac{R_c}{R_{\max}} \quad (8)$$

ここで、 q は平均越波流量、 R_c は護岸天端高、 H_s は有義波高、 CH_s は最大打ち上げ高 $R_{\max}$ を意味する。

式(6)の係数 A は天端高が0の場合の流量を定める係数、 B は算定曲線の曲率を定める係数、 C は最大打ち上げ高を規定する係数である。これらの係数 A 、 B および C は以下のように表わされる。

$$A = 0.0046 + 0.0018 \cot \alpha \quad (9)$$

$$B = \begin{cases} 1.83 + 1.27 \cot \alpha; & \text{for } 1.0 \leq \cot \alpha \leq 5.3 \\ 9.86 - 0.25 \cot \alpha; & \text{for } 5.3 \leq \cot \alpha \leq 20.0 \end{cases} \quad (10)$$

$$C = \begin{cases} 1.52(1.35\xi_p) & ; 0 < \xi_p \leq 2 \\ 1.52(3.00 - 0.15\xi_p) & ; 2 < \xi_p \leq 12 \end{cases} \quad (11)$$

なお、 ξ_p はピーク周期を用いる surf similarity parameter であり、式(9)～(11)は $R_{\max} = CH_s$ が確率変数であるため、打ち上げ高分布が Rayleigh 分布に従うとし、打上げ波の数が100波の場合の最頻値に対して設定したものである(間瀬ら, 2003)。実験での測定値のばらつきを考慮する時には、 B に確率変数 e_B を乗じた $e_B B$ として与える。

直立護岸に対する越波流量算定式は、合田ら(1975)による越波流量算定図表を表せるようにした高山ら(1982)の算定式を用いる。式は複雑で長いのでここでは記載しない(高山ら(1982)の論文を参照)。

本研究では破壊モードとして越波による護岸の崩壊を考え、許容越波流量を Q として性能関数を次式で定義する。

$$Z = Q - q \text{ (wave overtopping formula)} \cdots (12)$$

護岸の越波による被災とは、越波流量 q がある許容越波流量 Q を越えることとする。許容越波流量 Q の値としては 0.001, 0.01, 0.02, 0.04 および $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を採用する。

いま、年間被災確率 P_f を 0.25 % から 2.0 % とする。統計的に被災確率は年によって独立であると仮定すると、供用年数 T_{ref} 年間の被災確率は次式で与えられる。

$$P(Z \leq 0; T_{ref} \text{ years}) \\ = 1 - [1 - P(Z \leq 0; 1 \text{ year})]^{T_{ref}} \cdots (13)$$

ここで、 $0.25 \% < P_f < 2.0 \%$ に対して式 (13) を用いると、 $T_{ref} = 50$ 年では被災確率は 12 % から 64 % の間となる。

式 (12) に含まれる外力変数は、以下のように与える。

a) 波浪、潮位および高潮偏差

波高と周期に関して Salih (1989) が解析した、リバプール湾における長期間の波高と周期の観測結果に基づき、下限値を有する Weibull 分布を用いる。有義波高およびピーク周期の平均値 μ 、標準偏差 σ および下限値 x_1 を表-1 に示す。波高と周期には相関があり、両者の相関係数を 0.6 とする。

水深は 17 m から 27 m まで潮位変動により変化しますが、平均水深は 22 m である。潮位分布は、図-2 に示す観測結果から得られる、平均値 $\mu = 0.275 \text{ m OD}$ および標準偏差 $\sigma = 2.362 \text{ m}$ の確率密度関数を用いる。

高潮偏差分布としては、平均値 $\mu = 0.019 \text{ m}$ および標準偏差 $\sigma = 0.192 \text{ m}$ である Gumbel 分布を用いる。天文潮位と高潮偏差の相関はないとし、互いに独立として扱う。

波高と高潮偏差の相関係数は、Hawkes and Svensson (2003) の研究に基づいて 0.7 とする。

表-1 波高・周期に対する Weibull 分布のパラメータ

Wave Height : $H_s(\text{m})$			Wave Period : $T_p(\text{s})$		
μ	σ	x_1	μ	σ	x_1
1.2	0.7	0.45	6.4	1.15	4.2

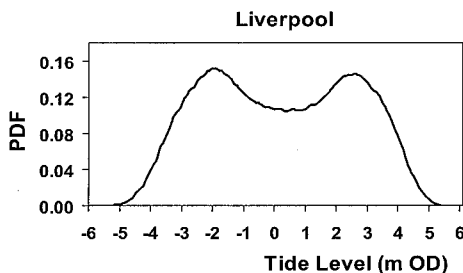


図-2 潮位の確率密度関数

b) 護岸関連パラメータ

信頼性解析においては、護岸勾配や前浜勾配も変動性を考えて、確率変数として与えることもできるが、本研究では傾斜護岸の勾配は 1:2 の固定値、また、前浜海底勾配も 1:30 の固定値とする。

c) 越波流量算定式における不確定性

Hedges and Reis の越波流量算定式では、算定式からの測定値のばらつきを確率変数 e_B を用いて考慮する。本研究では e_B の平均値を 1.1137、標準偏差を 0.4347、下限値を -1.1248 とする Log-Logistic 分布を用いる。

合田ら (1975) の越波流量算定式においても、真値と算定値にはばらつきがある。越波流量が小さいほど誤差は大きい。合田ら (1975) が示した越波流量の算定値 Q_{est} に対する真値 Q_{true} の推定誤差範囲、および、長尾ら (2005) が設定した推定精度の標準偏差を参考にして、誤差分布を以下のように設定した。

越波流量の算定値と真値の比の平均値は 1.0 とするが、上限値と下限値があること、また、常に正の値となることから、正規分布、Gumbel 分布、Gamma 分布および Rayleigh 分布は適用には適さない。Log-Normal 分布、Weibull 分布および Beta 分布は非対称な分布であり、Log-Normal 分布では常に正値を対象とし、Weibull 分布では下限値を与えることができる。Beta 分布であれば、上限値と下限値を設定することができる。そのため、本研究では表-2 に示す Beta 分布を採用する。

表-2 越波流量算定式における推定誤差分布

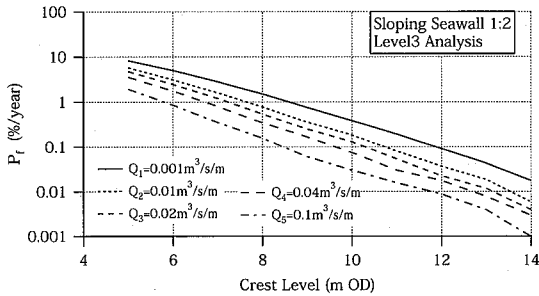
$q/\sqrt{2gH_0^3}$	Beta Distribution			
	μ	σ	x_1	x_2
10^{-1}	1	0.1	0.8	1.2
10^{-2}	1	0.15	0.7	1.5
10^{-3}	1	0.3	0.4	2
10^{-4}	1	0.4	0.2	3
10^{-5}	1	0.45	0.1	5

(2) 越波流量の許容値超過確率の算定

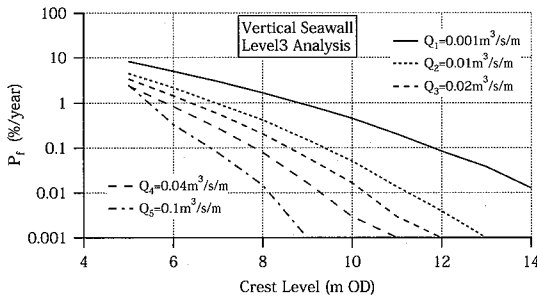
a) レベルⅢによる解析

勾配 1:2 の傾斜護岸および直立護岸のそれぞれに対して天端高を 5 m OD から 14 m OD まで変化させ、所定の許容越波流量に対して 5 万回の試行を行い、許容値超過確率、すなわち、年被災確率を図-3 のように得た。

両図より、1) 天端高の増加によって破壊確率は小さくなる、2) 許容越波流量が大きくなると破壊確率は小さくなることからわかる。また、傾斜護岸でのある許容越波流量における、天端高の増加量に対する破壊確率の減少量と、直立護岸での天端高増加量に対する破壊確率減少量を比較すると、直立護岸の方が大きい。その傾向は

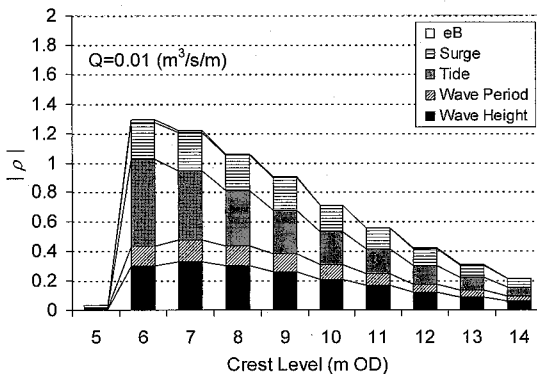


(a) 傾斜護岸

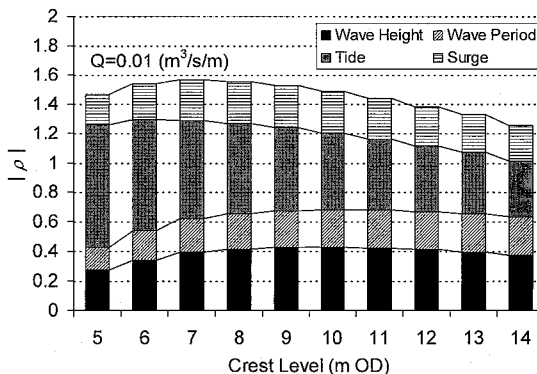


(b) 直立護岸

図-3 設計水準レベルⅢによる年被災確率



(a) 傾斜護岸



(b) 直立護岸

図-4 順位相関係数

許容越波流量の値が大きいほど顕著である。

許容越波流量が $0.01 \text{ m}^3/\text{s/m}$ の場合、傾斜護岸および直立護岸に対する性能関数の出力値と外力変数値とのスピアマン順位相関係数の絶対値を各天端高に対して図-4に示す。ここで、順位相関係数とは、順位データから求められる相関の指標であり、性能関数の出力値の順位と対応する各外力変数との順位相関によりどの入力が有意であるかを知ることができる。

傾斜護岸における各外力確率変数の順位相関係数の符号は、波高、周期、天文潮位および高潮偏差は全て为天端高に対して負である。 e_B は正負どちらの値も取るが、その値はほぼ0であるので e_B の影響はほとんど無視できる。順位相関係数が負であることは、外力値が大きくなると性能関数の値が小さくなることを示す。それぞれの外力に対する順位相関係数は天端高が6mでほぼピークとなり、天端高が大きくなるにつれて0に近づく。

直立護岸における各外力確率変数の順位相関係数の符号については全て負であり、各確率変数の順位と性能関数値の順位の間には負の相関がある。鉛直護岸では、どの外力確率変数についても天端高の影響は少ないことがわかる。

b) レベルⅡによる解析

Reis (1998) による PARASODE-BALI (Probabilistic Assessment of Risks Associated with Seawall Overtopping, Dune Erosion & Breakwater Armour Layer Instability) を用いて設計水準レベルⅡ解析を行った。

図-5は、1:2の傾斜護岸に対して、許容越波流量をパラメータとして天端高を変化させた場合の年被災確率を示したものである。この図より、天端高が大きくなるにつれて被災確率は小さくなり、どの天端高に関しても許容越波流量が大きくなるにつれて被災確率が小さくなることからわかる。また、この結果は図-3(a)に示した結果とほぼ同じである。

直立護岸については、被災確率が計算できない(収束しない)場合が多かったため本論文には載せていない。計算結果が得られなかった理由としては、高山ら(1982)の算定式が複雑すぎ、また、算定式の微分値が連続でないことが挙げられる。

図-6に年被災率に対する各外力変数の寄与率を示す。本研究では波高と周期、および波高と高潮偏差に相関を有するとして解析したので、波高、周期、高潮偏差それぞれの独立した影響度を判断することはできない。ここでは、3つの変数の影響を合わせた結果をみるが、これらの被災率に及ぼす寄与は非常に大きい。また、Tideとして示した天文潮位の影響や算定式に内在する誤差分布の影響は、無視できるものではないことがわかる。

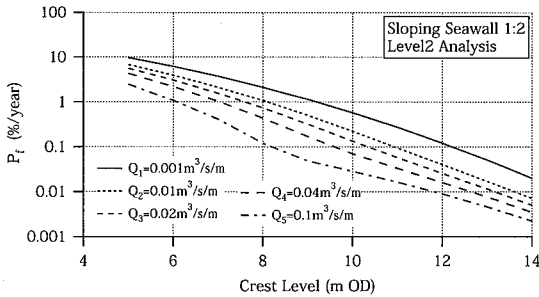


図-5 設計水準レベルⅡによる年被災確率

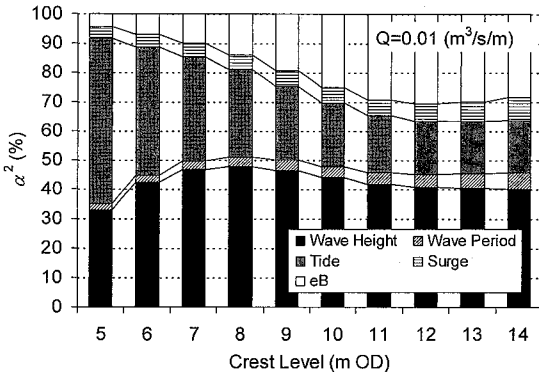


図-6 年被災確率に及ぼす外力要因の感度

なお、波高と高潮偏差の相関がないとした解析を行った結果、図-6に比べて高潮偏差の寄与分が若干小さくなり、波高の寄与分が増えた。こうした感度解析により外力要因の影響度を調べ、どの要因の影響が大きいかを知り、更なる外力の分布特性を研究すべきか否かの判断に使える。

なお、傾斜護岸について、設計水準レベルⅢおよびレベルⅡの解析で得られた被災確率を比較したところ、すべての許容越波流量および天端高で、設計水準レベルⅢとレベルⅡではほぼ同じ被災確率が得られることがわかった(間瀬ら, 2007)。

4. 護岸天端高の設定方法

長尾ら(2005)は、全国89の護岸に対して、合田ら(1975)の越波流量推定図や関本ら(2004)の許容沈下量算定図をもとにして、各護岸の許容越波流量に対して護岸の必要水面上天端高の算定を行った。それは、越波流量の推定値に対する誤差を考慮して余裕高の合理的な設定法を検討するのが目的であった。その結果、必要護岸天端高 h_c を従来設計で算定される天端高 h_{cd} で正規化した無次元量の確率分布として、平均値が1.0および標準偏差が0.15の対数正規分布を提案した。これを用いることにより、目標天端高に対して被災確率を算定でき、逆に被災確率を設定して天端高を設定できる。

本研究では、外力要因の確率分布特性および越波流量算定誤差をより詳細に考慮できるように、信頼性設計法の設計水準レベルⅢおよびレベルⅡの解析手法により、許容越波流量を超過する確率を求めることができることを示した。被災確率を設定し、対応する護岸天端高を求めることができる。従って、余裕高を経験的に導入することなく、護岸天端高を設定できる。

5. ま と め

本研究では、信頼性設計法の設計水準レベルⅢおよびレベルⅡの解析方法を用い、仮想の傾斜護岸および直立護岸を考え、許容越波流量を超過する確率を算定し、同時に各外力要因の影響度を解析した。ここで示した方法を用いれば、供用年数間における許容破壊確率を現行設計示方書へのキャリブレーションに基づいて設定することができれば、護岸天端高を決定することができる。

参 考 文 献

- 河合弘康・高山知司・鈴木康正・平石哲也(1997): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港研報告, 第36巻, 第4号, pp. 3-41.
- 合田良実・岸良安治・神山豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港研報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 関本恒浩・森屋陽一・長尾毅(2004): 越波量に基づく傾斜護岸の許容沈下量算定手法, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 113-118.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.
- 長尾 毅・藤村公宣・森屋陽一(2005): 越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 773-778.
- 間瀬 肇・Terry S. Hedges・Mohamed Shareef・永橋俊二(2003): 波の打上げを考慮した傾斜護岸に対する越波流量算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 636-640.
- 間瀬 肇・高橋真弘・安田誠宏・Maria T. Reis・Terry S. Hedges(2007): 信頼性解析に基づく越波流量に及ぼす要因影響評価, 京大防災年報, 第50号B(印刷中).
- Hawkes, P.J. and C. Svensson, (2003): Joint Probability: Dependence mapping and best practice, R&D Interim Technical Report FD2308/TR1, HR Wallingford, UK, 120p.
- Hedges, T.S. and M. T. Reis, (1998): Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model, Water, Maritime & Energy Journal, Proc. ICE, Vol. 130(1), pp. 1-10.
- Reis, M.T. (1998): Probabilistic assessment of the safety of coastal structures, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK, 603p.
- Salih, B.A. (1989): Properties of wave climates, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK, 684p.