

ケーソン堤の滑動破壊モードに着目した 効率的損傷確率算定手法について

興野俊也*・赤石沢総光**・吉田郁政***
鈴木修一****・長船徹****

防波堤の滑動破壊モードを対象に、限界沖波波高の考え方を導入したモンテカルロシミュレーションを実施し、損傷確率の算定方法について検討を行った。設定した 15 ケースの断面について損傷確率を算定し、従来の安全率との比較を行った。さらに、モンテカルロシミュレーション結果から、滑動量を目的変数とした重回帰分析を行い感度をもとめ、部分安全係数を算定した。そして、いくつかの設置水深に対して、算定した部分安全係数を用いた防波堤の試設計を行い、その適用性を確認した。その結果、部分安全係数から求めた堤体幅の安全性は異なる設置水深に対しても比較的安定しており、合理的な設計となることがわかった。

1. はじめに

近年、ISO 2394 や Eurocode のような国際規格および港湾の施設の技術上の基準など国内の各種設計指針では、限界状態の直接的照査及び安全裕度の確率論的な定量的評価が主流となりつつある。ケーソン堤の滑動破壊に対する限界状態の直接的評価法は、従来の力の釣り合いによる安全率から、谷本ら (1996) による滑動量算定に基づく限界状態照査に移行しつつある。一方、確率論的な安全性評価は 2 次モーメント法などの近似解法なども使われてきたが、計算機の発達に従いモンテカルロシミュレーション (以降 MCS と記す) によるアプローチが現実的なツールとなっている。下迫・高橋 (1998)、興野ら (2000)、赤石沢ら (2002) は MCS を実施し、期待滑動量に基づいた防波堤の信頼性評価あるいは設計法への適用性について報告している。

本検討では期待滑動量ではなく、防波堤の実挙動を直接的に表す滑動量そのものを対象に限界状態を設定し、その損傷確率の算定手法を提案する。損傷確率の算定にあたっては、損傷度曲線を作成する必要があるが、吉田・鈴木 (2003) は耐震問題を対象として限界指標に対する直接的な MCS を行い、効率的な損傷度曲線算定手法を提案している。本検討では、この手法をケーソン堤の滑動破壊モードに適用し、効率的な損傷確率算定手法について検討し、その適用性を明らかにした。また、MCS の結果から滑動量を目的変数、不確定性を有する各種設計因子を説明変数とした重回帰分析を実施した。この結果より感度係数を求め、性能マトリックス活用による部分安全係数の算定を試み、安全係数算定手法の有効性を示した。

2. 限界沖波波高による損傷度曲線の算定方法

損傷度曲線を算定する場合、図-1 に示すように多く

の沖波波高レベルに対して MCS を実施して条件付き損傷確率を求める方法が一般的と思われる。この方法では MCS を数多く実施して z_0 (=限界滑動量/解析より求めた滑動量) が 1.0 を下回る比率を連ねて損傷度曲線を求めることになる。図では確率算定のための波高レベルを 3 回としているが実際にはより多くの MCS が必要である。それに対して本検討では、図-2 に示すように防波堤の滑動量が限界滑動量に達する沖波波高 (以降、限界沖波波高と呼ぶ) を逆算し、これに対して MCS を行う。

以下、損傷度曲線算定のための式を示す。限界状態関数 g を用いて損傷領域を以下のように定義する。

$$g(S, x_R) < z_0 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 S , x_R , z_0 はそれぞれ沖波波高、その他の不確定変数、損傷を定義する閾値である。 x_R , z_0 が確定的に与えられたときに $g(S, x_R) = z_0$ が成り立つ S を逆算する関数が $R(z_0, x_R)$ で与えられるとすると、式 (1) で与えられる損傷領域は次式でも表現できることになる。

$$R(z_0, x_R) < S \quad \cdots \cdots (2)$$

損傷度曲線は、外力レベル S に対する条件付き損傷確率であることから、次式で求めることができる。

$$R_R(S) = \int_{R < S} f(S, x_R) dx_R \\ = \int U(S - R(z_0, x_R)) f_{x_R}(x_R) dx_R \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、沖波波高とその他の不確定変数に関する確率密度関数が分離できるとした。また、 $U(x)$ はステップ関数であり、 x が非負であれば 1.0、負であれば 0.0 であることを表している。

式 (3) の積分を MCS によって行う。確率密度関数 $f_{x_R}(x_R)$ に従って発生させた n 個のサンプル $x_R^{(j)} (j=1, n)$ 及びディラックの δ 関数を用いて、確率密度関数 $f_{x_R}(x_R)$ に関して次の近似表現を行う。

$$f_{x_R}(x_R) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta(x_R - x_R^{(j)}) \quad \cdots \cdots (4)$$

これを式 (3) に代入して積分を実行すると次式で損傷度曲線が求められる。

* 正会員 東京電力(株)技術開発研究所建設技術グループ
** 正会員 工修 東京電力(株)技術開発研究所建設技術グループ
*** 正会員 工博 東電設計(株)第二土木本部
**** 正会員 東電設計(株)第二土木本部

$$F_R(S) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U(S - R(z_0, x_R^j)) \quad \dots\dots\dots (5)$$

計算手順としては確率密度関数 $f_{x_R}(x_R)$ に従って発生させたサンプルから単純に R を求め、 S 以下となる比率を算定すればよい。限界沖波波高の逆算は通常の z_0 の計算よりも時間はかかるものの、一回の MCS で一本の損傷度曲線を求めることができ効率的である。

3. 検討条件

防波堤の滑動量算定には、谷本ら（1996）の滑動量算定モデルに基づき、阿部ら（1999）が提案している時化モデルを適用した 1 時化に対する滑動量算定手法を用いた。

考慮する設計条件のばらつき、推定誤差については、コンクリートと中詰材の単位体積重量は施工実績等による分析結果から確定値とし、潮位は太平洋岸におけるモデル地点の潮位観測データより平均潮位を中央値とする正規分布で近似した。時化の継続時間と有義波周期は、太平洋岸 3 地点の波浪観測データによる阿部ら（1999）の考え方をを用いた。波浪変形係数、波力算定、摩擦係数

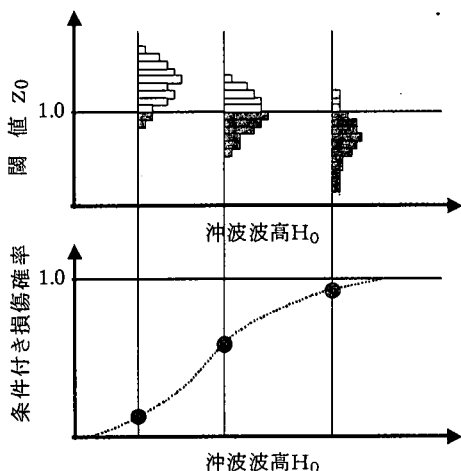
の平均値の偏りと変動係数は下迫・高橋（1998）の提案値を用いた。なお、確率変数の分布形は正規分布とし、確率変数の上下限値は $\pm 2\sigma$ とした。これらをまとめて表一に示す。

限界値は限界状態ごとに別途定義しておく必要がある。本検討では、表二に示すように防波堤の性能を健全、機能保持、長期機能喪失回避という被災レベルに対応した 3 段階とし、各耐波性能毎に耐波性能 1 は 10 cm、耐波性能 2 は 30 cm、耐波性能 3 では 10 m と仮定した。また、5 章の部分安全係数の算定では、表三に示すように波浪レベルと耐波性能の組合せ（性能マトリックス）に基づき検討した。

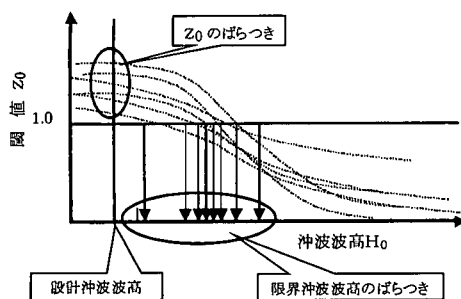
4. 損傷確率の算定

本検討では、表四に示すように各設置水深に対して 3～5 ケースの堤体幅の直立ケーソン堤を対象に損傷度曲線の算定を行った。赤石沢ら（2001）による太平洋岸のモデル地点における波浪観測データに基づく極値統計解析より求めた波浪ハザード曲線を図三に示す。これと損傷度曲線より損傷確率を算定することができる。

例としてケース 14、耐波性能 3 に対するサンプルサイズ 100 回、2000 回の場合の損傷度曲線を図四に示す。比較のため 5 つの沖波波高についてそれぞれ従来法による



図一 損傷度曲線の算定方法（従来法）



図二 損傷度曲線の算定方法（提案法）

表一 各設計因子の統計特性および特性値

設計因子 f	分布形	平均的偏り	変動係数	特性値 f_k
波力算定誤差	正規	0.00	0.10	計算値
摩擦係数	"	0.00	0.10	0.60
波浪変形係数	"	0.00	0.10	計算値
潮位	"	0.00	0.415	HWL
時代継続時間	"	$\sigma : 6.84^{(1)}$		計算値 ⁽¹⁾
有義波周期	"	$\sigma : 2.00^{(1)}$		14 sec
コンクリート単体重量	ばらつき考慮しない			24.0 kN/m ³
中詰材単体重量	ばらつき考慮しない			20.0 kN/m ³

注 1) ここでは標準偏差 σ を直接与えるものとする。

注 2) 時化モデルを考え、計算値 = $14.6 H_p - 58.4$ (hr) ここに H_p : 時化のピーク波高 (m) とする。

表二 防波堤の目標性能と性能レベルに対する限界値

性能分類	耐波性能 1 (健全)	耐波性能 2 (機能保持)	耐波性能 3 (長期機能喪失回避)
要求性能	港湾内の諸作業、設備に全く影響がない。	港湾内の諸作業、設備への影響は軽微で運用上問題ない。	港湾内の諸作業に長期的な影響が生じない。
目標性能	船舶、荷役などに影響を及ぼす防波堤の変形がほとんどない。	船舶、荷役などに影響を及ぼす防波堤の有害な変形はない。	港湾諸施設に重大な影響を及ぼす防波堤の大変形がない。
限界滑動量	10 cm	30 cm	10 m

表三 検討に用いた性能マトリックス

設計波浪レベル	耐波性能 1 (限界滑動量 10 cm)	耐波性能 2 (限界滑動量 30 cm)	耐波性能 3 (限界滑動量 10 m)
L1 (30 年確率波)	○	—	—
L2 (50 年確率波)	—	○	—
L3 (100 年確率波)	—	—	○

MCS(試行回数 2000 回)を実施して算定した条件付き損傷確率も○印で示した。両者は、サンプルサイズ 2000 回の比較では非常によく一致していることがわかる。サンプルサイズ 100 回の場合は損傷確率 10^{-2} までしか求まっていないが、比較的良好な結果が得られている。特徴としては耐震問題などの損傷度曲線とは異なり外力レベルである沖波波高をいくら大きくしても累積損傷確率が 1.0 とはならないことが挙げられる。図-4 の例では最大でも 0.2 に至っていない。これは堤体に作用する波力に限界値があり、いくら沖波波高を大きくしても碎波の影響である一定以上の力が作用しないためである。以上の検討では、MCS のサンプリングは層別サンプリングと通常のランダムサンプリングの中間的な方法であるラテン方格法を用いた。

図-5 に、ケース 5、耐波性能 3 に関する損傷度曲線算定結果を示す。図の実線はサンプルサイズ 2000 回のラテン方格法を用いて算定した損傷度曲線である。累積損傷度曲線は最大でも 10^{-2} 程度であり、このような場合、通常のラテン方格法を用いると、サンプルサイズ 100 回程度では損傷度曲線を算定することができない。ケース 5 のように設置水深の浅いモデルでは沖波波高を十分多くしても損傷が生じない事象が多くなり 10000 回以上の非常に多くのサンプル数が必要になるケースも生じた。そこで、効率化を図るため加重ラテン方格法(吉田・鈴木, 2003)を適用した。図-5 に破線で示した損傷度曲線は、

サンプルサイズ 100 回の加重ラテン方格法を用いて算定した結果である。少ないサンプルサイズであるにもかかわらず低損傷確率まで算定することが可能となり、サンプルサイズ 2000 回のラテン方格法による損傷度曲線と比較するとやや小さくなっているが全体的には一致している。波浪ハザード曲線とこれらの損傷度曲線より求めた損傷確率は、ラテン方格法では 6×10^{-4} (信頼性指標 $\beta=4.0$)、加重ラテン方格法では 4×10^{-4} ($\beta=3.9$) であり、その差は小さい。

基本的にはラテン方格法を用いて損傷度曲線を算定したが、設置水深 12 m 及び 14 m、耐波性能 3 ではラテン方格法では必要となるサンプルサイズが非常に大きくなるため、その場合のみ加重ラテン方格法を用いて損傷度曲線の算定を行うこととした。

全ケースの耐波性能 1, 3 について、従来の安全率と算定された損傷確率の関係を図-6 に示す。設置水深が浅い場合の耐波性能 3 では安全率に応じて損傷確率が敏感に小さくなっているが、それ以外は感度が総じて鈍い。また、同じ安全率であっても設置水深に応じて損傷確率が異なることもあり、かならずしも安全率と損傷確率の大小関係は一致しない。特に、耐波性能 3、設置水深 12 m と 20 m に関して安全率 1.2 近傍となる検討ケースの損傷確率を比較すると約 2 オーダーも異なる。これは、水深が浅い場合、耐波性能 3 レベルの損傷を生じさせる波高が碎波限界波高によって制限され、ほとんど出現し

表-4 検討ケース一覧

設置水深	検討ケースおよび堤体幅				
12.0 m	15.5 m (ケース 1)	16.5 m (ケース 2)	17.9 m (ケース 3)		
14.0 m	17.0 m (ケース 4)	18.0 m (ケース 5)	19.0 m (ケース 6)	19.8 m (ケース 7)	
16.0 m	18.0 m (ケース 8)	19.0 m (ケース 9)	20.9 m (ケース 10)		
20.0 m	17.0 m (ケース 11)	17.5 m (ケース 12)	18.0 m (ケース 13)	18.5 m (ケース 14)	19.2 m (ケース 15)

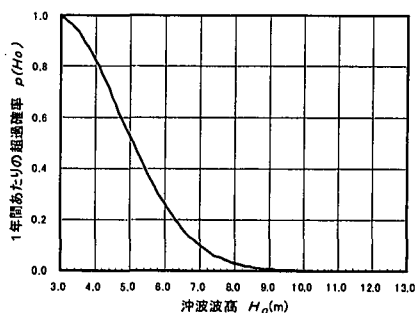


図-3 波浪ハザード曲線

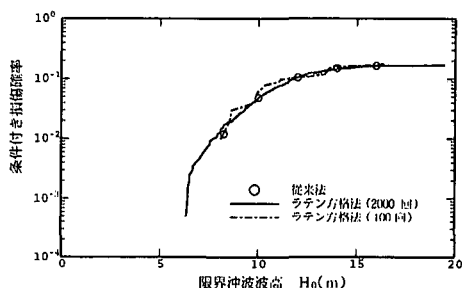


図-4 従来法と提案法の損傷度曲線

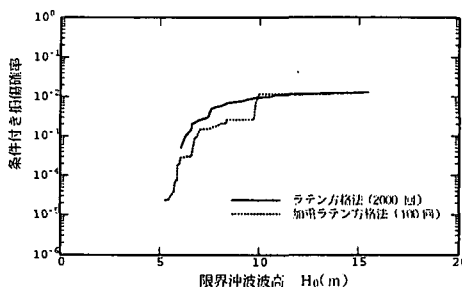


図-5 ラテン方格法と加重ラテン方格法による損傷度曲線

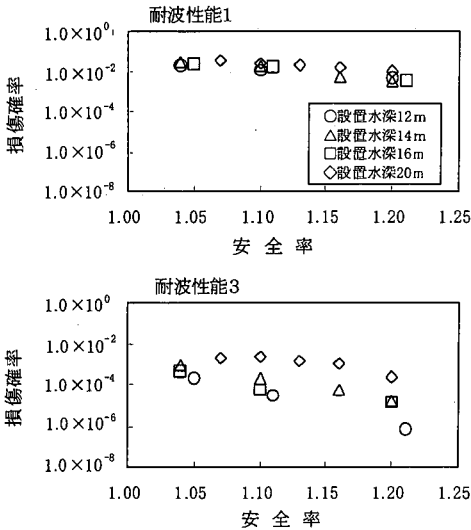


図-6 従来の安全率と損傷確率

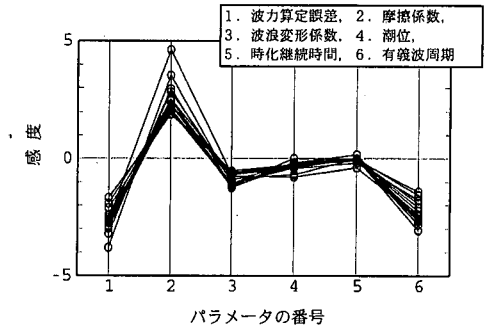


図-7 重回帰分析による偏回帰係数

表-5 部分安全係数算定結果

変数		耐波性能1	耐波性能2	耐波性能3
波力算定誤差	γ_1	1.10	1.10	1.10
摩擦係数	γ_2	1.02	1.03	1.12
波浪変形係数	γ_3	1.00	1.00	1.00
潮位	γ_4	1.00	1.00	1.10
時化継続時間	γ_5	0.00	0.00	0.00
有義波周期	γ_6	0.60	0.65	1.00

ないためと考えられる。このように、従来の安全率では表現できない安全裕度の違いが損傷確率を用いることにより表わすことができる。

5. 部分安全係数の算定

MCS結果に基づき、設計条件の不確定要因を説明変数、滑動量を目的変数とした重回帰分析を行い、その偏回帰係数から部分安全係数の算定に必要な感度係数 α (星谷・石井, 1986) を求めた。全ケースの耐波性能3における偏回帰係数に各標準偏差を乗じた値を図-7に示す。重相関係数は総じて高くほぼ0.9以上あり、非線形性はさほど強くない。

興野ら (2000) によると当波浪ハザード、設置水深20 mの条件では、堤体幅18.5 mの堤体モデルがライフサイクルコストの観点から有利と報告しており、この時の保有信頼度は耐波性能1では $\beta=1.1$ 、耐波性能2では $\beta=1.2$ 、耐波性能3では $\beta=1.9$ であった。これらを目標信頼性指標 β_i として部分安全係数を試算した。

部分安全係数を設計点 x_d と平均点 (特性値) μ の比として定義すると $\gamma=x_d/\mu$ となる。設計点は、設計変数空間で最も損傷が生じやすい点を表している。不確定変数が正規分布に従う場合、上記感度係数や変数の標準偏差から決まる α 値と目標信頼度 β を用いて対応する部分安全係数 γ が次式で求められる。

$$\text{摩擦係数} \quad \gamma_i = \mu_i / (\mu_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i) = 1 / (1 - \alpha_i \cdot \beta \cdot V_i) \cdots \cdots (6)$$

上記以外

$$\gamma_i = (\mu_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i) / \mu_i = 1 - \alpha_i \cdot \beta \cdot V_i \cdots \cdots (7)$$

ここで、 α_i は次式で表わされる。

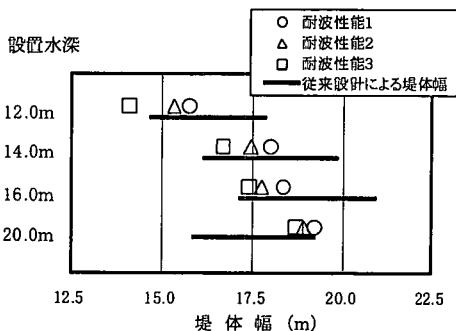
$$\alpha_i = \frac{\partial g}{\partial x_i} \sigma_{xi} / \sqrt{\sum_j \left(\frac{\partial g}{\partial x_j} S_{xj} \right)^2} \cdots \cdots (8)$$

また、 g 、 σ_i 、 V_i はそれぞれ限界状態関数、各不確定変数の標準偏差、変動係数である。

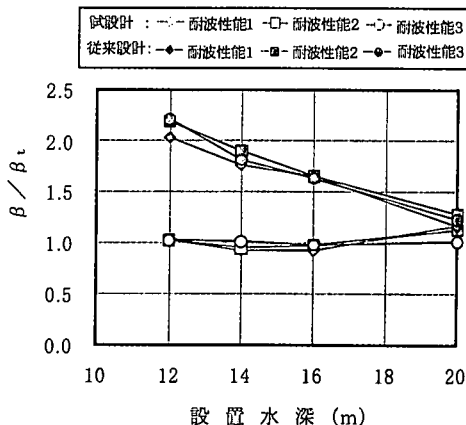
本モデルでは、継続時間と有義波周期の平均が他の変数との関係で変化するにも関わらず、標準偏差一定であるため変動係数が変化し、通常の部分安全係数の形では算定できない。そこで本検討では部分安全係数の代わりに設計のための係数として $\alpha_i \beta$ を求めた。すなわち、平均値から標準偏差の $\alpha_i \beta$ 倍ずらして設計することを要求することになる。算定された部分安全係数を表-5に示す。感度の高い波力算定誤差、摩擦係数、有義波周期に対して安全余裕を持たせた係数となっている。

この部分安全係数を用いて水深12、14、16及び20 mに対して試設計した結果を図-8に示す。図には従来の安全率1.0-1.2に対応する堤体幅も示した。水深20 mの場合はいずれの耐波性能に対しても目標とした堤体幅18.5 m近傍の値となった。設置水深12 m、耐波性能3の場合を除けば、設置水深12、14及び16 mの場合も従来の安全率1.0-1.2の範囲内に収まる結果となった。

部分安全係数を用いて求めた堤体幅と、従来の安全率の条件から求めた堤体幅に対してそれぞれMCSを行い、保有信頼性指標 β を算定した。図-9にそれらの β と目標信頼性指標 β_i との比を示す。従来の安全率による設計法の場合、設置水深に応じて安全裕度が異なり合理的でない。一方、部分安全係数から求めた場合は比較的安



図—8 部分安全係数を用いて求めた堤体幅と従来の安全率 (1.0-1.2) に対する堤体幅の比較



図—9 試設計結果と従来設計の保有信頼性指標による比較

定しており、合理的な設計となっている。

6. おわりに

本検討において得られた主な結論は以下の通りである。

① 従来の沖波波高レベルごとに MCS を実施するのではなく、限界沖波波高を逆算し直接的に損傷度曲線を求める効率的な MCS の方法を提案した。ラテン方格法または加重ラテン方格法を用いることにより、損傷確率算定のための MCS の回数をより少なくできる。

② 設計上クリティカルとなる耐波性能 3 では、同じ安全率でも設置水深の違いにより損傷確率 (安全裕度) がかなり異なる。このように損傷確率という指標を用いることで、安全裕度の違いを明確に表すことができる。

③ 耐波性能毎に設定した限界滑動量に対する目標信頼度を満足する設計が、部分安全係数を用いることにより従来設計に比べて効率的にできるようになった。また、これにより設置水深にかかわらず、従来設計よりも合理的な設計が可能となる。

ケーソン防波堤の設計では、基本設計段階で主な設計変数が堤体幅であることから、直接的に信頼性指標を用いる設計も比較的容易である。今後はデータベース化した損傷度曲線から直接的に設計を行う方法について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 赤石沢総光・長船 徹・興野俊也・阿部光信 (2001): 防波堤の性能設計における機能損失確率の推定について, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 IV, pp. 376-377.
- 赤石沢総光・長船 徹・興野俊也・阿部光信 (2002): 安全係数を用いた防波堤滑動量算定手法の構築に関する検討, 海工論文集, 第 49 巻, pp. 946-950.
- 阿部光信・興野俊也・長船 徹・貝沼憲男 (1999): 防波堤の信頼性設計法における時化のモデル化について, 海工論文集, 第 46 巻, pp. 916-920.
- 興野俊也・赤石沢総光・阿部光信・長船 徹 (2000): 性能設計活用による防波堤の設計合理化について, 海工論文集, 第 47 巻, pp. 816-820.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港空研報告, 第 37 巻, 第 3 号, pp. 1-30.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海工論文集, 第 43 巻, pp. 846-850.
- 長尾 毅・門脇陽治・土田 孝・寺内 潔 (1997): 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第 2 報) ~ 支持力安全性に関する検討 ~, 港研報告, 第 36 巻, 第 1 号, pp. 25-57.
- 星谷 勝・石井 清 (1986): 柳造物の信頼性設計法, 鹿島出版会.
- 吉田郁政, 鈴木修一 (2003): 限界地震動指標を用いた損傷確率の効率的な算定方法, 構造工学論文集, pp. 201-206.