

2013 年度（第 49 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 13-B-4

防波堤の信頼性設計

神戸大学 教授

長尾 毅

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2013 年 8 月

防波堤の信頼性設計

Reliability-based design of breakwaters

長 尾 毅

Takashi NAGAO

1. はじめに

信頼性設計法は構造物の破壊の可能性を確率論に基づく手法によって評価する方法であり、その評価方法に応じて3つの設計水準がある¹⁾。最も高位に属するレベル3は構造物の破壊確率 P_f によって、レベル2は信頼性指標 β によって、最も簡易なレベル1は部分係数 γ を用いた性能照査式によってそれぞれ評価される（表-1 参照）。信頼性設計法に関しては、例えば文献 1)2)3)4)が参考となる。

表-1 信頼性設計法の3つのレベル

設計水準	性能照査式	評価パラメータ
レベル3	$P_f \geq P_f$	破壊確率
レベル2	$\beta_f \leq \beta$	信頼性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$	設計用値

港湾の施設の技術上の基準⁵⁾においては、信頼性設計が本格導入されている。本稿では、信頼性設計の基本的な概念を解説するとともに、防波堤の信頼性設計について紹介する。

2. 信頼性設計法概説

(1)レベル3 信頼性設計法

レベル3の信頼性設計法においては、破壊確率を直接評価し、破壊確率が限界値以下になるように断面諸元を設定する。破壊確率は、確率変数の同時確率密度関数を破壊領域で多重積分することにより算出される（式(1)参照）。

$$P_f = \int \cdots \int_{g(\mathbf{x}) < 0} f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2, \dots, dx_n \quad (1)$$

ここに、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ は確率変数であり、 $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ は確率変数の同時確率密度関数、 $g(\mathbf{X})$ は性能関数である。

同時確率密度関数は、例えば、全ての確率変数が正規確率変数の場合は、式(2)により表現される。

$$f_X(\mathbf{x}, \mathbf{C}_x) = (2\pi)^{-n/2} |\mathbf{C}_x|^{-1/2} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)^T \mathbf{C}_x^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x) \right] \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{C}_x$ は共分散行列であり、 $\boldsymbol{\mu}_x$ は平均値である。

図-1 は簡単な独立な2変数の場合の破壊確率の概念図である。 $f_{X1}(x_1)$ 、 $f_{X2}(x_2)$ は周辺確率密度関数であり、釣鐘状の $f_{X1X2}(x_1, x_2)$ は同時確率密度関数である。2変数の場合、同時確率密度分布は3次元空間における釣鐘状の分布として表現でき、この多重積分は体積となる。すなわち、全領域で多重積分を行うと結果は体積=1となる。破壊確率は、この同時確率密度関数の破壊領域、すなわち図における $Z < 0$ の領域の体積ということになる。

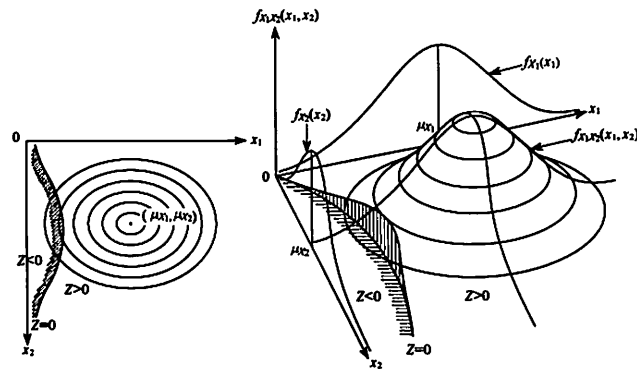


図-1 破壊確率の概念図

ただし、実際の問題にこの多重積分を適用することは困難な場合が多い。一般に多重積分は3重以上の高次の場合には困難であるし、同時確率密度関数を陽な形式で求められない場合もある。このため、式(1)を直接評価するのではなく、モンテカルロシミュレーション(MCS)によって破壊確率を評価する場合がほとんどである。

MCSの一般手順は次のとおりである。

- ① 擬似乱数（一様乱数）を発生させる。
- ② 一様乱数を、必要な確率分布および相関を有する乱数に変換する。
- ③ 得られた乱数の組み合わせを用いて、構造物の安全性を評価する。
- ④ 以上の評価を数多く実施し、破壊と判定された回数を全試行回数で除して破壊確率とする。

ここで、コンピューター内で発生される乱数は、種（seed）に従って一定のルールで発生されるものであるため、擬似乱数と呼ばれる。一様乱数の発生アルゴリズムとしては、乗積合同法や線形合同法などが多く使われてきた。現在でも、各種のアプリケーションの組み込み関数にはこれらの方法が使われていることが多い。ただし、乱数発生アルゴリズムに求められる要件として周期の長さ等があり、線形合同法などには周期等の面で問題があるため、現時点ではメルセンヌ・ツイスタ（Mersenne Twister）などが世界標準的な手法であるといえる。Mersenne Twisterのソースコードは、web上に公開されているものを用いることができる。

一様乱数からそれ以外の確率分布への変換は、確率分布関数の逆演算による。例えば、正規確率変数に変換するためには、式(3)を用いればよい。

$$x_i = \mu_x \{1 + \Phi^{-1}(r_i) V_x\} \quad (3)$$

ここに、 r_i は一様乱数、 Φ は標準正規確率分布関数であり、 $\mu_x V_x$ はそれぞれ平均値、変動係数である。

このほかに、正規確率変数への変換としてはBox and Muller⁶⁾による方法も広く用いられている。さらに、正規確率変数への変換方法として、中心極限定理を利用するものもあるが、その適用にあたっては、分布の裾（tail）の部分の適合性に注意が必要である。なぜなら、通常構造物に求められる破壊確率は非常に小さな値であり、小さな破壊確率の正確な評価のためには確率分布の裾の正確な再現性が求められるためである。防波堤の滑動問題に適用した場合、中心極限定理を利用すると裾の部分の再現性が低いために破壊確率を過小評価することが知られている⁷⁾。確率変数が互いに相関を有する場合は、独立な確率変数を、共分散行列を用いた変換などによって相関を有する確率変数に変換しなければならない。

MCSは式(4)に示す多重積分の代わりに、式(5)によって破壊確率の近似解を得る方法である。

$$p_f = \int \cdots \int I[g(\mathbf{x}) \leq 0] f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (4)$$

$$p_f \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(\mathbf{x}_j) \leq 0] \quad (5)$$

ここに、 I は破壊判定関数であり、 $I < 0$ のときに 1、それ以外はゼロの値をとる。

MCS においては、試行回数の設定に注意が必要である。式(5)の近似の有効性は、試行回数に依存するためである。MCS の試行回数は、一般的に、破壊確率の変動係数（式(6)）が十分に小さくなる回数として設定される。

$$V(\hat{p}_f) = \sqrt{\frac{\hat{p}_f(1-\hat{p}_f)}{N}} \frac{1}{\hat{p}_f} \approx \frac{1}{\sqrt{\hat{p}_f N}} \quad (6)$$

ここに、 V は変動係数、 $\hat{p}_f$ はMCSによる破壊確率評価値、 N は試行回数である。

MCS による誤差 ε は式(7)により算出できる⁴⁾。これより、破壊確率が小さな値の場合、試行回数が十分でないと大きな誤差となる可能性があることが分かる。このため、一回毎の試行に計算負荷の問題があるからといって、少ない試行回数で確率の評価を行うことは絶対に避けなければならない。

$$\varepsilon\% = \sqrt{\frac{1-p_f}{p_f N}} \times 200\% \quad (7)$$

MCS の計算精度を必要な水準に保ちながら計算効率を高める幾つかの方法が考案されており、それらは **Variance Reduction Techniques(VRT)**と総称される。これに対して、サンプリングにおいて特に工夫を行わない原始的な MCS は **crude Monte Carlo 法**と呼ばれる。今後は VRT の適用が標準的なものとなると考えられる。

VRT の代表的な方法として **Importance Sampling Method**（重点サンプリング法）がある⁸⁾。これは、式(4)にサンプリング密度関数（sampling density function）（式(8)の $h(\mathbf{x})$ ）を導入するものである。sampling density function の決定においては、後述する FORM により求められる設計点（design point）の情報を用いる場合が多い⁷⁾。サンプリング密度関数の設定が適切でないと、収束が遅くなる場合があるので注意が必要である。

$$p_f = \int \dots \int I[g(\mathbf{x}) \leq 0] \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})}{h(\mathbf{x})} h(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (8)$$

この他、上述した擬似乱数を用いるのではなく、準乱数と呼ばれる超一様分布列（Low-Discrepancy Sequences）⁹⁾を用いる方法もある。

(2) レベル 2 信頼性設計法

レベル 2 信頼性設計法においては、破壊確率を評価するのではなく、信頼性指標 β を評価して、これが限界値以上となるように断面諸元を設定する。信頼性指標は、その値が大きいほど構造物の破壊確率が小さいことを示す。信頼性指標 β と破壊確率 p_f の間には、式(9)に示す関係がある。これを図化したものが図-2 である。

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (9)$$

ここに、 Φ ：標準正規確率分布関数である。

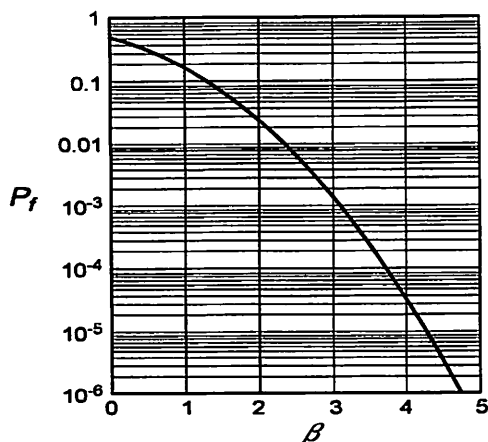


図-2 信頼性指標と破壊確率の関係

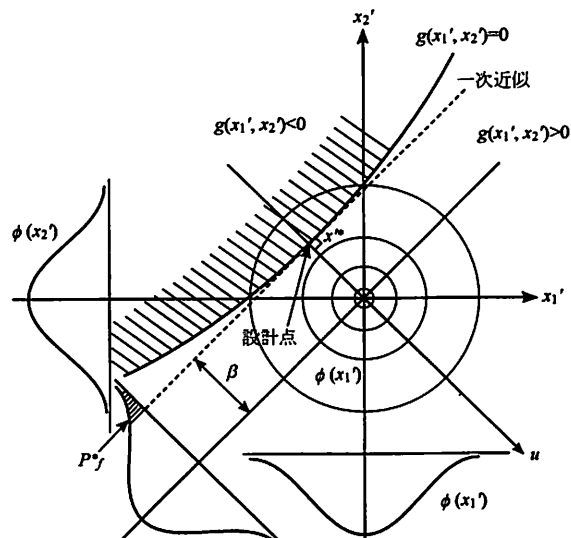


図-3 FORMにおける信頼性指標

信頼性指標 β の最初の定式化は Cornell¹⁰⁾によるもので、性能関数の1次と2次までのモーメント(それぞれ、平均値、分散)のみを用いることから1次近似2次モーメント法(FOSM: First-Order Second-Moment Method)と呼ばれる。FOSMの欠点を克服すべく提案されたものが Hasofer and Lind¹¹⁾による信頼性指標であり、確率変数が正規確率変数の場合に1次近似の範囲において正確な結果を与える。その後、Rackwitz and Fiessler¹²⁾は正規確率変数以外の場合に拡張する方法を示し、これが FORM (First-Order Reliability Method) と呼ばれる。

FORMにおいては、確率変数を互いに独立な標準正規確率変数に変換し、標準正規確率変数ベクトルにより構成される標準化空間において性能関数を評価する。次に、標準化空間における原点から限界状態局面(性能関数がゼロとなる局面)への最短距離を探索し、これを信頼性指標とする。

ここで、標準正規確率変数への変換について注意点を述べる。まず、確率変数が正規確率変数以外の場合には、注目している位置において確率密度と確率分布の値が同時に等しい正規確率変数に変換する(normal tail transformation)。いま扱うのは破壊確率を求める問題であるため、破壊点における確率密度と確率分布の値が等しければ、裾の分布形状は破壊確率に影響しない。従って、上記の正規確率変数への変換は、破壊確率に関して誤差をもたらさない。次に、確率変数が正規確率変数で、かつ相互に相関を持つ場合には、コレスキー分解により独立な正規確率変数の線形結合に変換する必要がある。さらに、相互に相関を持つ一般の確率変数(正規確率変数以外の確率変数)に対しては、Nataf変換¹³⁾などを用いる必要がある。

いま、確率変数として独立な2変数の単純な場合を考えると、FORMにおける信頼性指標は図-3のように表現することができる。FORMの特徴は、図-1における体積(2変数の場合)を考えるのではなく、ある点(設計点: design point)を中心に性能関数を線形近似することにより、2次元空間における問題に単純化して、原点と破壊点の距離として表現する点にあるといえる。その時、近似を行う際に、誤差が最も少なくなる点を設定することが肝要であるが、それが限界状態局面(性能関数がゼロとなる局面)のうち同時確率密度が最も大きくなる点であるため、その点を探索する。ここで、図-3と図-1との違いは、標準化空間に変数変換が行われていることであり、従って同時確率密度は原点で最大、同心円状にコンターが表現できることになる。よって、設計点は、原点から限界状態局面までの最短距離の点となる。

いま、Hasofer and Lind¹¹⁾が扱ったように、確率変数が正規確率変数の場合で、相互に相関がない場合には、信頼性指標は式(10)によって定義される。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (10)$$

ここに、 Z ：性能関数、 X^* ：確率変数 X の破壊点における値、 $\square$ ：平均値、 $\square$ ：標準偏差

信頼性指標の算出過程においては、式(11)により表される感度係数 α を算出する必要がある。感度係数 α は、性能関数の線形化近似における線形化近似係数である。

$$\alpha_{X_i} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} = -\frac{X_i'}{\beta} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

$$\text{ここに、} X_i' = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (12)$$

式(11)は、標準化空間における信頼性指標の各確率変数軸への方向余弦を表す（図-4 参照）。感度係数は、耐力側のパラメータに対しては正值、作用効果側のパラメータに対しては負値となり、確率変数間に相関がない場合には、その自乗和は1となる。また、図より明らかなように、感度係数の絶対値が1に近い確率変数ほど、破壊点における標準化値が信頼性指標に一致する傾向となり、信頼性指標に及ぼす影響が大きいことを意味する。

また、確率変数間に相関がある場合には、性能関数の標準偏差や感度係数において、確率変数間の相関係数 ρ が考慮され、式(13)、式(14)で表される。

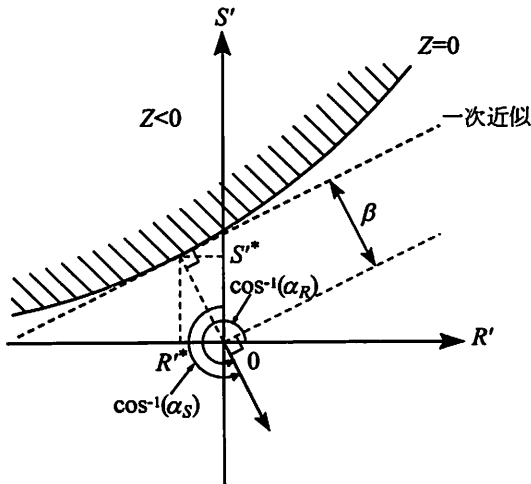


図-4 信頼性指標 β と感度係数 α

$$\sigma_Z' = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} \sigma_{X_i}} \quad (13)$$

$$\alpha_i' = \sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} / \sigma_Z' \quad (14)$$

FORM はあくまで性能関数の1次近似により信頼性指標を評価していることに注意が必要である。例えば、図-4 に示す斜線部分が真の破壊領域であるとき、FORM においては図中の点線で示す直線に近似してしまうため、両者の間の領域の分だけ誤差が生じていることになる。

(3) レベル1 信頼性設計法（部分係数法）

部分係数による設計法は、国際標準である ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）、土木・建築にかかる設計の基本（国土交通省）等において施設の標準的な性能照査手法として推奨されている。港湾基準では、これらの上位基準等への適合、並びに設計実務の簡便性等を考慮して、レベル 1 信頼性設計法（部分係数法）を標準的な性能照査手法としている。

レベル 1 信頼性設計法（部分係数法）とは、特性値に部分係数を乗じて得られる設計用値を算出し、式(15)により、耐力の設計用値 R_d が作用効果の設計用値 S_d を上回ることを確認することによって、施設の性能を照査する手法である。

$$Z = R_d - S_d \geq 0 \quad (15)$$

ここに、式(15)中の作用効果及び耐力の設計用値は、式(16)、式(17)で得られる。

$$S_d = S(s_{1_d}, s_{2_d}, s_{3_d}, \dots) \quad (16)$$

$$R_d = R(r_{1_d}, r_{2_d}, r_{3_d}, \dots) \quad (17)$$

また、波浪等の作用、材料特性等、性能照査に必要な要因である各設計因子の設計用値は、式(18)、式(19)で得られる。

$$s_{i_d} = \gamma_{s_i} s_{i_k} \quad (18)$$

$$r_{j_d} = \gamma_{r_j} r_{j_k} \quad (19)$$

ここに、 s_{i_d} ：作用効果の設計因子 s_i の設計用値、 γ_{s_i} ：作用効果の設計因子 s_i の部分係数、 s_{i_k} ：作用効果の設計因子 s_i の特性値、 r_{j_d} ：耐力の設計因子 r_j の設計用値、 γ_{r_j} ：耐力の設計因子 r_j の部分係数、 r_{j_k} ：耐力の設計因子 r_j の特性値

レベル 1 信頼性設計法における部分係数 γ_X は、確率変数 X が正規分布に従う場合には、上述した信頼性指標及び感度係数を用いて、式(20)により算出することができる。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (20)$$

ここに、 β_T ：目標信頼性指標、 V_X ：確率変数 X の変動係数、 μ_X ：確率変数 X の平均値、 X_k ：確率変数 X の特性値

(4) 目標安全性水準の設定方法

信頼性設計法の適用においては、目標安全性水準をどのように定めるかが重要な課題のひとつである。その方法には様々なものがあるが、①過去の設計基準類の平均的な安全性水準に基づく方法、②ライフサイクルコスト最小化に基づく方法が有力な方法といえる。港湾基準においては、過去の設計基準類へのキャリブレーションに基づく方法を用いている。

ライフサイクルコストを指標とする方法を採用する場合にあつては、一般に、設計供用期間（50 年とする）中に発生する費用をライフサイクルコストと定義し、複数の被災可能性を考慮する。ライフサイクルコストの期待値は式(21)により示される。

$$ELC = C_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{f_j}}{T} C_f R \quad (21)$$

$$R = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^{k-1}} \quad (22)$$

$$E_{f_j} = \nu_j T P_{f_j} \quad (23)$$

ここに、 ELC ：ライフサイクルコストの期待値、 C_i ：初期建設費、 m ：対象とする作用のランク数、 T ：設計供用期間（50年）、 E_{f_j} ：対象とする作用による期待被災回数、 C_f ：破壊時費用、 i ：社会的割引率、 P_{f_j} ：対象とする作用による破壊確率、 ν_j ：対象とする作用の年平均発生率（ $=1/R$ ）、 R ：対象とする作用の再現期間

この方法の概念を示すと図-5 のようになる。一般に、ライフサイクルコストは最小値（最適値）の左右で異なった傾向を示し、最小値の右側（危険側）では破壊確率の変化に敏感で、破壊確率が増加するに伴ってライフサイクルコストは急激に増加するが、最小値の左側（安全側）では破壊確率が減少するにしたがってライフサイクルコストは緩やかに大きくなるとされる。

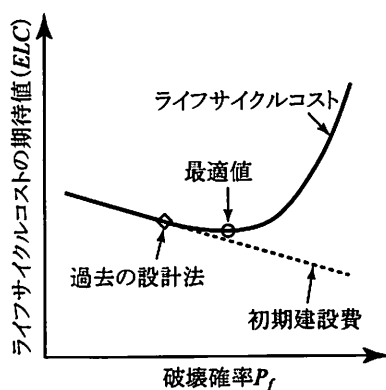


図-5 ライフサイクルコスト最小化に基づく方法

3. 部分係数法による防波堤の信頼性設計¹⁴⁾

わが国における防波堤は重力式防波堤が一般的である。防波堤の外部安定照査は滑動，転倒，支持力の3つの破壊モードを対象に行われる。性能関数は式(24)～式(26)の通りである。

(滑動破壊)
$$Z = f\left\{\sum_i W_i - P_B - P_U\right\} - P_H \quad (24)$$

(転倒破壊)
$$Z = \left(a_1 \sum_i W_i - a_2 P_B - a_3 P_U\right) - a_4 P_H \quad (25)$$

(支持力破壊)
$$Z = \sum \left\{ \left[c's + (w' + q) \tan \phi' \right] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi'} \right\} - \left\{ \sum (w' + q) \sin \theta + a_5 P_H / r \right\} \quad (26)$$

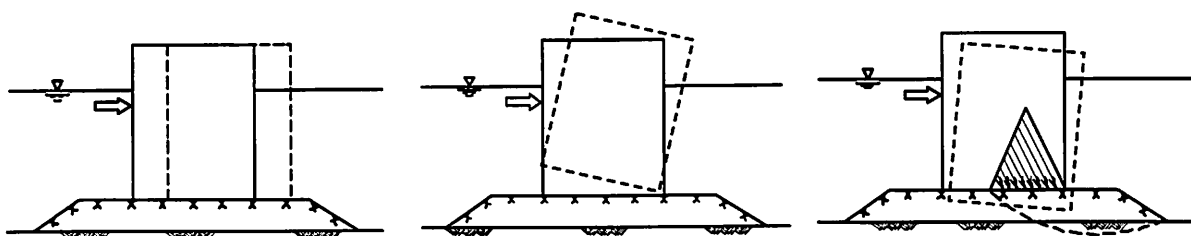


図-6 破壊モード（左から，滑動，転倒，支持力破壊）

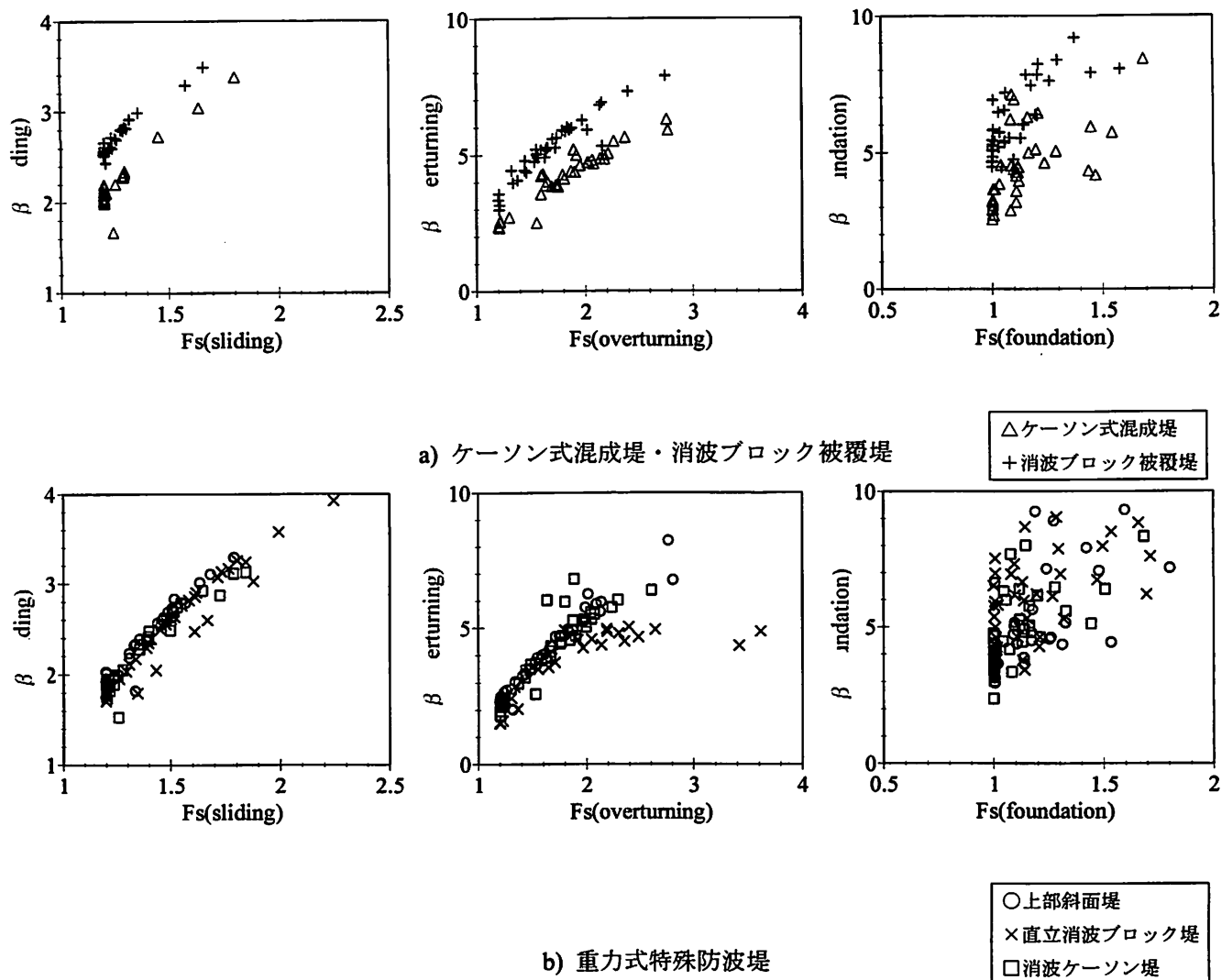


図-7 安全率と信頼性指標の関係

ここに、 f : 堤体底面と基礎との摩擦係数、 W_i : 堤体を構成する材料（鉄筋コンクリート、無筋コンクリート、中詰砂）の重量 (kN/m)、 P_B : 堤体に作用する浮力 (kN/m)、 P_U : 堤体に作用する揚圧力 (kN/m)、 P_H : 堤体に作用する水平波力 (kN/m)、 $a_1 \sim a_5$: 各荷重のアーム長 (m)、 c' : 有効応力に基づく見かけの粘着力 (kN/m²)、 s : 分割細片の幅 (m)、 ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 (°)、 w' : 分割細片の重量 (kN/m)、 q : 分割細片に作用する上載荷重 (kN/m)、 θ : 分割細片の底面となす角 (°)、 r : すべり円弧の半径 (m)

式より明らかなように、滑動破壊については水平方向の力の釣合いによって、転倒破壊については堤体前趾回りのモーメントの釣合いによって、支持力破壊については簡易ビショップ法によって性能関数を定義している。ここで、支持力破壊については、防波堤が原地盤および捨石マウンドの2層系の基礎地盤であり、かつ防波堤に作用する荷重合力が偏心かつ傾斜していることを考慮して、防波堤の支持力安定性を最もよく表現できる性能関数として導入されているものである。

2007年版以前の港湾基準においては安全率を用いた設計法が採用されていた。安全率と信頼性指標の関係を示すと図-7 のようになる。ここで、信頼性指標は、表-1 に示す確率分布をもとに（すべて正規分布と仮定）算出されたものである。

表-1 設計因子の従う確率分布

	B	V
波力(P_H, P_U)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
上部斜面堤	0.96	0.18
直立消波ブロック堤	0.97	0.18
消波ケーソン堤	0.97	0.16
潮位 (w)		
$r_w=1.5$	1.00	0.20
$r_w=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数 (f)	1.06	0.15
単位体積重量 (W, w')		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04
基礎地盤	1.00	0.03
基礎地盤強度 ($c', \tan \phi'$)	1.00	0.10

注) B : 平均値の偏り (平均値/特性値)

V : 変動係数

滑動モード、転倒モードについては安全率と信頼性指標には正の相関が認められるが、支持力モードについては相関は極めて低い。特に、各モードの現行設計法における許容安全率(滑動および転倒は 1.2, 支持力は 1.0) 相当の信頼性指標にはかなりのばらつきがある。これは、同じ安全率であっても、耐力 R と作用効果 S を構成する要素の占める割合が様々に変化しており、このため $R-S$ で表現される性能関数のばらつきが変化することによる。また、支持力モードでは偏心傾斜荷重における安全性として簡易ビショップ法による円弧すべり解析を行うが、円弧すべり問題では地盤強度の空間自己相関の影響により安全率が一定であっても円弧の大小により信頼性指標が大きく変化する。支持力モードにおける信頼性指標のばらつきはこのような点が原因である。

防波堤の外的安定は滑動・転倒・支持力の3つのモードがあり、そのいずれが生じても防波堤は破壊と評価される。このような直列システム (series system) のシステム破壊確率は式(27)により得られる。

$$P_f = \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i < j} \sum_{j < k} P(E_i \cap E_j) + \sum_{i < j < k} \sum_{j < l} P(E_i \cap E_j \cap E_k) - \dots \quad (27)$$

ここに、 P_f はシステム破壊確率、 E は各モードの破壊事象である。

防波堤の外部安定の場合、図-7 に示したように、滑動が支配的なモードであり、転倒および支持力安全性指標は概して高いため、3 次の結合破壊確率は極めて小さいものと判断される。このことから、これを無視した式(28)によっても十分な精度が得られるものと考えられる。また、2 次の結合破壊確率は Owen¹⁶⁾に従って算出することができる。式(29)に、滑動・転倒の結合破壊確率を評価する式を示す。ここで、破壊モード間の相関係数は、感度係数によって評価可能である (式(30))。

$$P_f \leq \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} P(E_i \cap E_j) \quad (28)$$

$$\Phi_2(-\beta_s, -\beta_o, \rho_{so}) = \Phi(-\beta_s) \cdot \Phi(-\beta_o) + \int_0^{\rho_{so}} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta_s^2 - 2t\beta_s\beta_o + \beta_o^2}{1-t^2}\right)\right) dt \quad (29)$$

$$\rho_{so} = \sum_X \alpha_{X,s} \cdot \alpha_{X,o} \quad (30)$$

ここに、 Φ : 標準正規確率分布関数、 ρ : 相関係数、 α : 感度係数であり、添え字 s および o はそれぞれ滑動、転倒を示す。

表-2 システム信頼性指標の比較

構造形式	平均値	標準偏差
上部斜面堤	2.16	0.34
直立消波ブロック堤	2.04	0.38
消波ケーソン堤	2.05	0.32
ケーソン式混成堤	2.11	0.14
消波ブロック被覆堤	2.64	0.15

れないことから、両者の平均値（2.38）を目標値とした。また、特殊な防波堤については、代表的な 2 形式と目標値を合わせる方法も考えられるが、建設コストに与える影響を考慮し、各構造形式の平均値を目標値とした。以上、本研究で用いる目標システム信頼性指標を、目標システム破壊確率に換算すると、それぞれ、ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤が 0.87%、上部斜面堤が 1.5%、直立消波ブロック堤が 2.1%、消波ケーソン堤が 2.0%となる。

さて、目標信頼性指標については、考慮する事象が単一の破壊モードである場合には、現行設計法が担保する平均信頼性指標がそのまま目標値となる。しかしながら、本問題のような直列システムの場合には、システム信頼性指標の平均値 $\beta_{T_{sys}}$ をそのまま目標値 β_T とすることは適切ではないと考えられる。なぜなら、仮に各モードの信頼性指標が $\beta_{T_{sys}}$ を満足するように設計したとしても、設計結果が保有するシステム信頼性指標は、必ず $\beta_{T_{sys}}$ を下回るからである。そこで、FORM により $\beta_{T_{sys}}$ を満足する断面をまず決定し、その断面における各モードの信頼性指標のうちから最小値を抽出した。さらに、これを全事例について平均し、部分係数の設定に用いる目標値 β_T とした。この方法により得られた信頼性指標は、ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤が 2.40、上部斜面堤が 2.24、直立消波ブロック堤が 2.12、消波ケーソン堤が 2.10 となり、いずれも $\beta_{T_{sys}}$ よりも若干高い値となっている。

次に感度係数は、各設計因子が信頼性指標に及ぼす影響度を表す係数であるから、信頼性指標が変化すると、断面の変化によって各設計因子の特性値が変化するため、結果、感度係数も変化する。そこで、各破壊モード別に β_T をちょうど満足する断面をまず決定し、その断面における感度係数を全事例について平均した値を用いることとした。これにより、感度係数のばらつきは低減されるとともに、目標破壊確率との分散の小さい合理的な部分係数を得ることができると考えられる。

以上の検討により得られた目標信頼性指標 β_T 、各設計因子の確率分布、感度係数を用い、算出した部分係数を表-3 に示す。さらに、レベル 1 信頼性設計法の安全性照査式を以下に示す。

$$(\text{滑動}) \quad \gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (31)$$

$$(\text{転倒}) \quad a_1 \sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - a_2 P_{Bd} - a_3 \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq a_4 \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (32)$$

$$(\text{支持力}) \quad \left\{ \begin{aligned} & \sum \left\{ \left[\gamma_c c'_k s + (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k \right] \right. \\ & \times \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k / F_f} \left. \right\} \\ & / \gamma_a \left\{ \sum (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \sin \theta + a_5 \gamma_{P_H} P_{Hk} / r \right\} \\ & \geq F_f = 1.0 \end{aligned} \right. \quad (33)$$

表-2 に、システム信頼性指標の算出結果を示す。ここで取り上げた 5 種類の防波堤のうち、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤は代表的なものであり、その他の 3 種類は特殊な形式といえる。代表的な 2 形式については、平均信頼性指標が異なっているが、これは明瞭な意図のもとに安全性水準の差が設定されてきたとは考えら

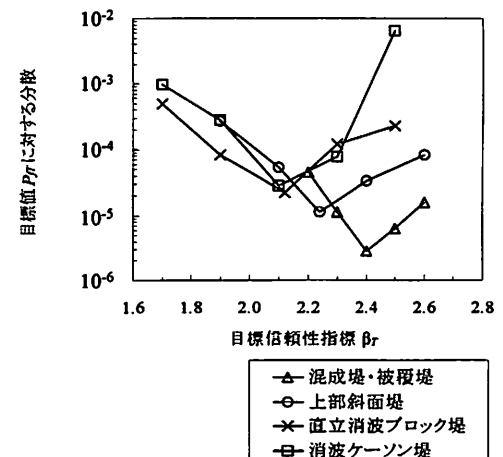


図-8 最適案の判定

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{wt} w l_k + h) B_C \quad (34)$$

ここに、 γ ：添字の設計因子に対する部分係数、添字 k, d ：それぞれ特性値および設計用値、 F_f ：支持力に関する補助パラメータ、 ρ_w ：海水の密度 (kg/m^3)、 g ：重力加速度 (m/s^2)、 wl ：潮位 (m)、 h ：水深 (m)、 B_C ：堤体幅 (m)

その他の記号については、式(24)～式(26)と同一である。また、式(34)は、ケーソンがフーチングを有しない場合の浮力設計用値の算定式である。前述した目標信頼性指標の違いや感度係数の違いにより、同一の設計因子であっても、構造形式や性能関数によって異なる部分係数を用いることとなる。ここで、消波ブロック被覆堤の水平波力・揚圧力に対する部分係数に 1.0 を下回る値があるのは、波力の平均値の偏り B が、1.0 を大きく下回っているためである。支持力安全性照査式(33)における F_f は、簡易ビンヨップ法による収束計算において、抵抗モーメントが起動モーメントを上回ることを確認するための補助パラメータである。また、上載荷重の特性値 q_k は、波力、浮力および堤体重量の部分係数を用いない特性値をもとに計算される値であることに注意を要する。さらに上載荷重載荷幅 $2b'$ (等分布荷重に換算した上での載荷幅) に対する部分係数は、その特性値を平均値に変換するための係数である。また、

表-3 部分係数

r			ケーソン式 混成堤	消波ブロッ ク被覆堤	上部斜面堤	直立消波 ブロック堤	消波 ケーソン堤
滑動	f		0.79	0.77	0.80	0.83	0.84
	P_H, P_U	水深変化 緩	1.04	0.91	1.05	1.09	1.07
		水深変化 急	1.17	1.01	1.19	1.22	1.20
	wl	$r_w=1.5$	1.03	1.04	1.03	1.05	1.02
		$r_w=2.0, 2.5$	1.06	1.08	1.05	1.11	1.04
		H.H.W.L.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	W_{RC}		0.98	0.98	0.98	—	0.98
	W_{NC}		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
W_{SAND}		1.01	1.01	1.01	—	1.01	
転倒	P_H, P_U	水深変化 緩	1.15	1.01	1.17	1.20	1.16
		水深変化 急	1.31	1.14	1.33	1.34	1.30
	wl	$r_w=1.5$	1.04	1.06	1.04	1.08	1.03
		$r_w=2.0, 2.5$	1.09	1.13	1.09	1.15	1.05
		H.H.W.L.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	W_{RC}		0.98	0.98	0.98	—	0.97
	W_{NC}		1.02	1.02	1.02	1.01	1.02
	W_{SAND}		1.00	1.00	1.00	—	1.00
支持力	P_H	水深変化 緩	1.12	0.97	1.13	1.15	1.12
		水深変化 急	1.26	1.09	1.28	1.28	1.25
	q		0.55	0.34	0.63	0.62	0.65
	$2b'$	上載荷重載荷幅	1.89	3.25	2.18	1.65	1.73
	w'		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	$\tan \phi'$		0.96	0.95	0.96	0.95	0.96
	c'		0.99	0.99	0.99	0.98	0.99
	a	構造解析係数	1.00	1.00	1.00	0.76	0.92

支持力信頼性指標の計算においては、簡易ビショップ法による性能関数自体に内在する安全性の余裕度があるため、構造解析係数に相当する γ_a を導入してこの点を考慮している。

部分係数の最適案の判定は次式によって行った。すなわち、目標システム破壊確率 P_{FT} とレベル1設計結果が保有するシステム破壊確率 P_{FL1} の分散が最小となる案を最適案として採用する。

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{FT} - P_{FL1,i})^2 \rightarrow \min \quad (35)$$

式(20)の β_T を変化させた場合の判定結果を図-8に示す。いずれの構造形式も、上記の方法により定めた β_T を用いた場合に目標値に対する分散が最小となっており、部分係数のキャリブレーションが適切になされていると判断できる。これは、目標信頼性指標や感度係数を絞り込んでおいたことが大きい。

図-9は、レベル1設計法と現行設計法が保有するシステム信頼性指標のばらつきを比較したものである。いずれの構造形式も、レベル1設計法によるシステム信頼性指標のばらつきは、現行設計に比較して極めて小さくなっているとともに、その平均値は現行設計と同程度になっている。表-3に示したように、部分係数は細かく設定されている。係数の設定の仕方として、細かく設定するのではなく、0.1刻みか、せいぜい0.05刻み程度にとどめるべきとする考え方もあろう。ただし、係数を大まかに設定してしまうと、図-9に示したようなばらつきの少ない信頼性指標は得られない。様々な考え方がありえるであろうが、港湾基準ではあくまで目標信頼性指標に近い値が得られることを最優先したということである。また、建設コスト比（レベル1設計／旧基準設計）は平均的にほぼ1.0となっている。

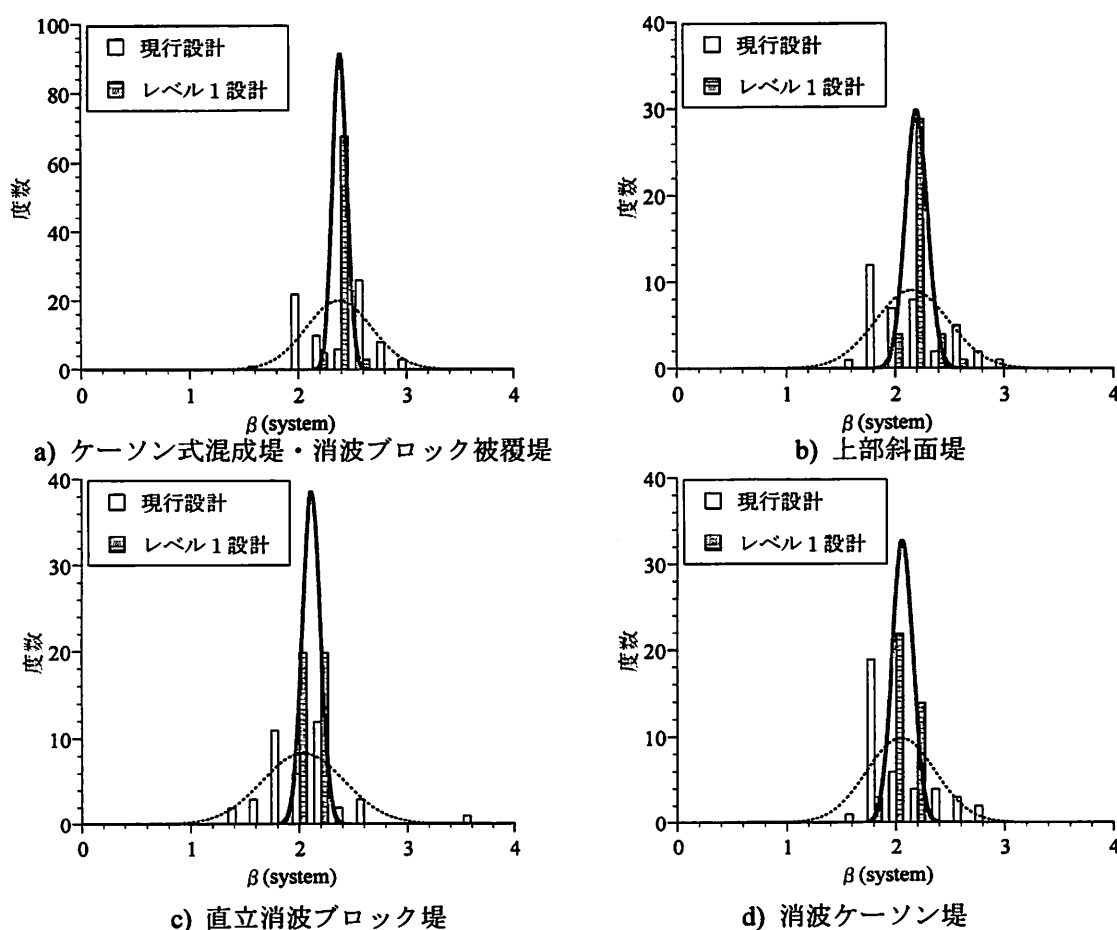


図-9 システム信頼性指標のばらつき

4. 防波堤の滑動量に関する信頼性設計

防波堤の3つの破壊モードのうち、滑動に関しては力の釣合に基づく安定性の議論だけではなく、滑動量を確率的に評価する方法がある。MCSを用いた防波堤の累積滑動量¹⁷⁾に関する破壊確率の算定方法は以下の通りである。

まず、極値分布に従って沖波波高をサンプリングし、浅水変形、砕波変形を考慮して堤前位置での有義波高を求める。有義波高は波群の代表波高であるので、レーリー分布を適用することで個別波高を求める。この際に砕波の影響を考慮する。

次に、式(1)に示す滑動に関する運動方程式を右边が正の条件下において2回積分することにより1波毎の滑動量を算定する。これを1年間繰り返す、さらに設計供用期間繰り返すことにより累積滑動量を求める。これを滑動量許容値と比較し、破壊か安定かの判定を行う。以上の試行を繰り返すことにより破壊確率を評価する。

$$\left(\frac{W}{g} + M_a\right) \frac{d^2 x}{dt^2} = P_H - f(W' - P_U) \quad (36)$$

ここに、 W : 堤体の空中重量(kN/m), g : 重力加速度(m/s^2), M_a : 付加質量($=1.0855 \square \rho_0 h'^2$) (t/m), ρ_0 : 海水の密度(1.03 t/m^3), h' : 堤体底面から静水面までの高さ(m), x : 堤体の滑動量(m), P_H : 堤体に作用する水平波力(kN/m), W' : 堤体の水中重量(kN/m), P_U : 堤体に作用する揚圧力(kN/m), f : 堤体底面と基礎との摩擦係数

ここで、高波は毎年1回来襲することとし、その継続時間は2時間としている²⁾。したがって、平均周期を6秒とした場合、1年あたり1200波が防波堤に作用することとなる。また、水平波力および揚圧力の従う波力の時刻歴モデルとしては、衝撃波力および砕波波力成分を表す三角形パルス($P_2(t)$)と重複波力成分を表す正弦波形($P_1(t)$)を組み合わせた波形モデル¹⁸⁾を用いている。

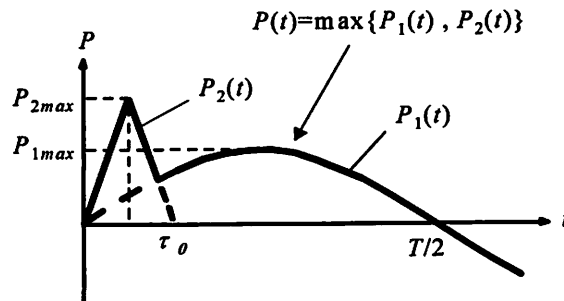


図-10 波力時刻歴モデル¹⁸⁾

前述したように、この方法で滑動量の確率的評価を行うためには乱数発生方法に注意が必要で、かつMCSの試行回数にも十分な注意が必要である⁶⁾。crudeMCSで十分な精度で50年間の累積滑動量に対する破壊確率を評価するためには 4×10^5 程度の試行回数が必要である¹⁹⁾。

図-11はある条件に対して、乱数発生の方法を線形合同法(LCG)、メルセンヌ・ツイスタ(MT)、超一様分布列(LDS)の3種類設定して50年間の累積滑動量が10cm, 30cm, 100cmを超過する確率を比較したものである⁶⁾。図より分かるように、破壊確率はLDSが最も高く、LCGが最も低い。LCGではLDSとの比で平均的に0.79倍の破壊確率しか算出されない。防波堤の滑動が生じるのは、耐力側のパラメータ（たとえば摩擦係数）に非常に低い値がサンプリングされた時や、作用側のパラメータ（たとえば波力算定精度）に非常に高い値がサンプリングされた時である。LCGの破壊確率が最も低いのは、このような破壊が生じる可能性のあるケース、即ち確率分布の裾の部分を十分に再現できていないためである。

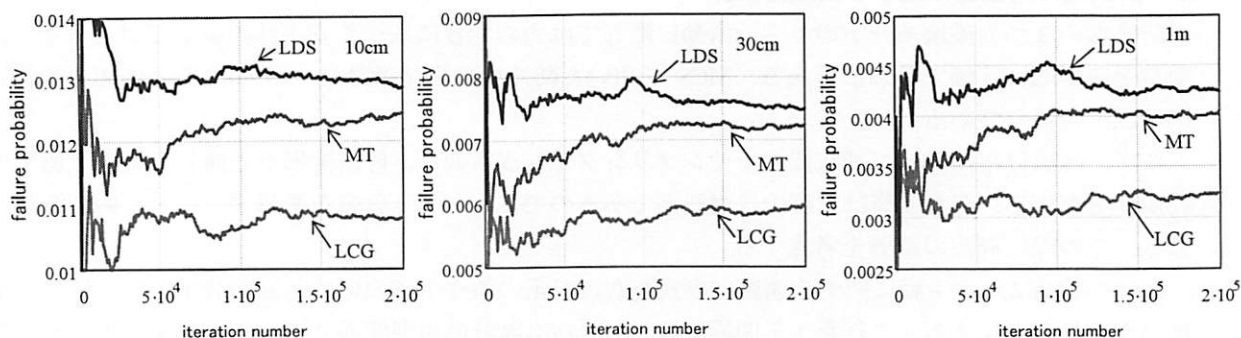


図-11 滑動量に関する破壊確率の比較⁶⁾

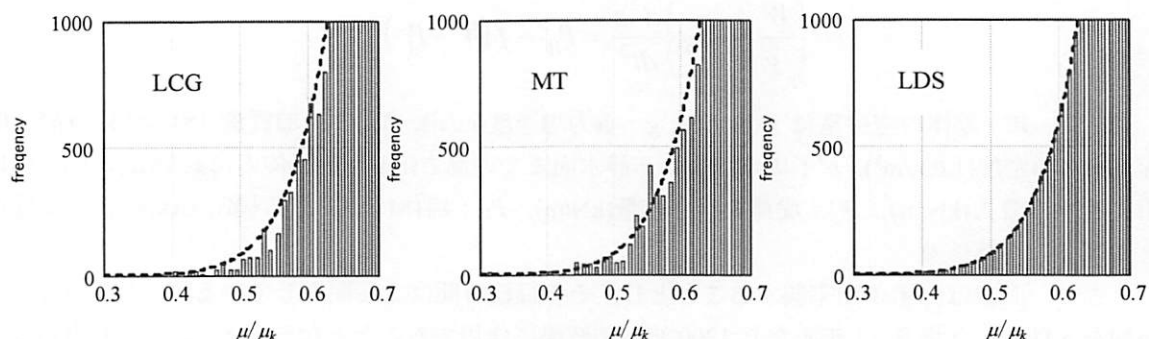


図-12 摩擦係数のサンプリング状況⁶⁾

このことを確認するため、摩擦係数を例に取り、各方法による160万回サンプリング時の分布の裾の部分の再現状況を理論値と併せて図-12に示す。LDSでは理論曲線と非常によく一致しているが、LCGでは理論曲線よりも再現される回数が非常に少なく、このため破壊確率を過小評価する。MTは裾の再現性はLDSに比べ劣っているが、LDSと比較して必ずしも破壊確率を過小評価するわけではない。これは作用側のパラメータの波高が碎波の影響を受けるために裾部分の再現性の問題が軽減される場合があるためと考えられる。

MCS の試行回数の問題については、重点サンプリング法を適用して計算負荷を軽減できることが報告されている¹⁹⁾。ただし、防波堤の累積滑動量の確率的評価は、波浪の繰り返し作用による累積値に対するMCSの適用の問題となり、繰り返し回数が多い場合には重点サンプリング法の適用にあたって慎重な検討が必要である。これは、繰り返し作用回数の増加に伴って **design point** が平均値に近付くことが原因である。

このため文献19)に示す方法では、50年の累積滑動量に対する問題を1年の滑動量を求める問題としてまず扱い、ここに重点サンプリング法を適用して滑動量の確率分布関数を数値的に評価する方法を提案した(MCS1)。50年の累積滑動量については、1年の滑動量に対する確率分布関数から50回サンプリングすることで評価することとし、確率分布関数において滑動量がゼロの確率が非常に高いことに着目して50年の滑動量の確率分布関数を効率よく評価する方法を提案した(MCS2)。この方法によれば、MCS1は設計供用期間50年の **crudeMCS** としては 4×10^4 回に相当する 2×10^6 回試行回数で概ね十分であり、かつMCS2は3000回程程度の試行回数で収束する。さらにMCS2は他のシミュレーションと比較して計算負荷が非常に少ない。従って、この方法の適用で防波堤の累積滑動量に関する破壊確率評価の効率化が図られると考えられる。

図-13は、ある条件に対して crudeMCS と重点サンプリング法 (IS1~3) の破壊確率収束状況 (MCS1) を示したものである。crudeMCS では 10^7 回の試行でも収束していないのに対して、重点サンプリング法では良好な収束を示していることが分かる。なお、この MCS は 50 年の累積ではなく、1 年間の滑動量に対する MCS (MCS1) であることに注意が必要である。

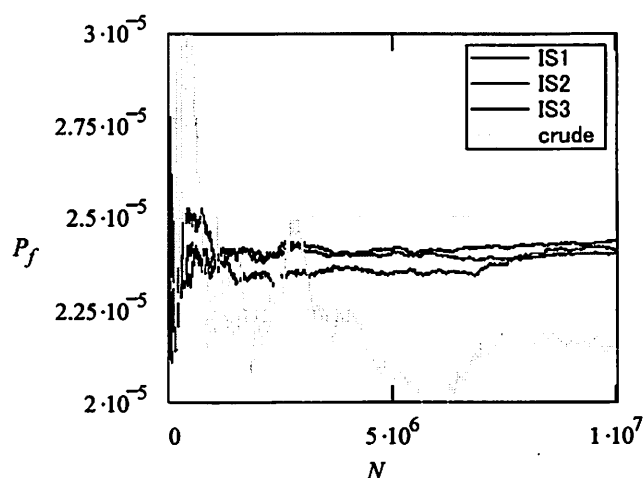


図-13 破壊確率収束状況¹⁹⁾

5. LCC 最小化に関する信頼性設計

信頼性設計法における目標安全性水準の設定法として、過去の技術基準類における平均的な安全性水準を目標とするのではなく、ライフサイクルコスト(LCC)が最小と

なる水準を目標とする考え方が存在する。現時点では、被災時費用の算定方法などに統一的な手法が整備されていないため研究段階であるが、LCC最小化を目標とすれば建設費用が縮減できる可能性があること、さらに、既存の防波堤については被災時の復旧水準をLCCの観点で整理すれば合理的な維持管理手法が適用できる可能性が高いことから、盛んに研究が行われている^{20)~27)}。ここでは、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤を対象として、異なる耐波安定性を有する防波堤断面を設定し、設計供用期間中の直接被害額および間接被害額を計上し、LCCを最小にする耐波安定性水準を検討した事例²⁴⁾を紹介する。

検討対象はMCSによる累積滑動量に着目した滑動破壊モードのみとしている。これは、波浪の作用による沈下量や傾斜量を精度よく査定する方法が現時点では存在しないこと、防波堤の波浪による被害は滑動破壊モードが支配的であることによる。LCC算定に当たり、被害額として、構造物の被害に伴う直接被害額と背後の係留施設が利用できないことに伴う間接被害額を計上している。

直接被害額については、消波ブロック被覆堤およびケーソン式混成堤について、過去15年間の被災事例から滑動量と復旧工法、復旧工費の関係を整理し、それぞれ図-14、図-15に示すようなモデルを設定した。横軸は相対滑動量 ($x = \text{滑動量} / \text{港内側マウンド肩幅}$)、縦軸は、相対被害額 ($y = \text{直接被害額} / \text{新規製作費}$) である。消波ブロック被覆堤では、相対滑動量0.7~1.0の間にケーソンの据え直しの割合が増え、急激に復旧費が上昇するが、混成堤では、前面に消波工がないため、相対滑動量が小さい間にも据え直し等が発生し、相対滑動量0.0~1.0の間で復旧費が上昇するモデルとした。また、消波ブロック被覆堤と同様に、相対滑動量が3.0を超えるとケーソンの新規製作とし、復旧工費の上限をケーソンの新規製作工費とした。

間接被害額については、対象港が利用できない場合の代替港を設定し、代替港利用時の輸送コスト増分を間接被害額として計上した。防波堤の被災程度と荷役施設利用率の関係は、「港湾投資の評価に関する解説書」(2004)から設定している。滑動量解析結果から、防波堤の被災延長を求め、同解説書で示されている防波堤の被害率(被災延長/全延長)と静穏度の関係、静穏度と岸壁利用率の関係をを用いて、被災延長に応じた利用率の低下を計算し、次式から間接被害額を算出している。

$$Bs = (1 - Ur) \times Cmax \quad (37)$$

ここに、 Bs : 年間の間接被害額、 Ur : 利用率、 $Cmax$: 代替港利用時の最大間接被害額である。

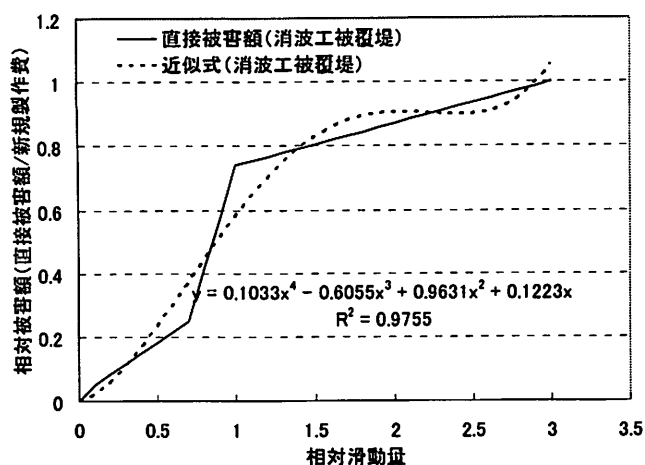


図-14 消波ブロック被覆堤直接被害額算定モデル

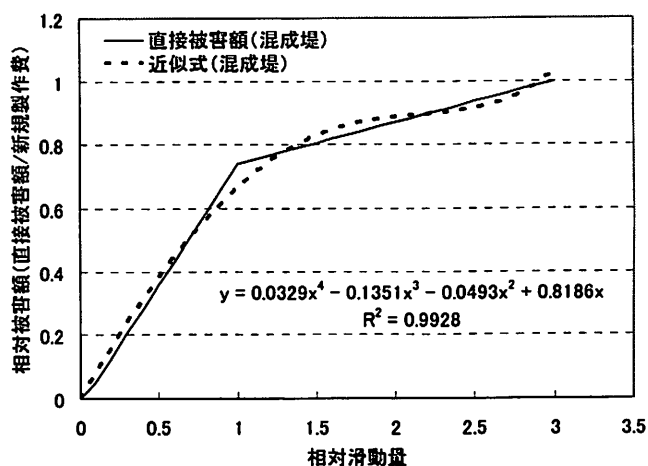


図-15 ケーソン式混成堤直接被害額算定モデル

滑動量から被災延長を算出する際、滑動量の延長方向分布が対数正規分布に従うとして、対象とするケーソン函数の滑動量を求め、港内側のマウンド肩幅を超えた場合を転倒とみなし、その函数を全函数で除して被災延長を求めた。

さらに、滑動量と間接被害額との関係について、予め700万ケース程度の滑動量と被災延長の関係を、乱数を用いて作成し、滑動量と間接被害額との関係を求め、図-16に示す。図の横軸は滑動量（ x ）で、縦軸は相対間接被害額（ y = 間接被害額 / 最大間接被害額）で式(37)の B/C_{max} に相当する。この図の関係をを用いて、滑動量解析モデルで算出した毎年の累積滑動量から間接被害額を算出している。

LCCの計算は、F港とS港の防波堤断面を対象とし、部分係数を考慮した耐力作用比で0.6～1.4の間で防波堤断面を設定した。例として、耐力作用比1.0のF港の消波ブロック被覆堤とS港の混成堤の断面図を図-17に示す。また、計算波浪は、各港の観測値から設定された沖波極値分布を用いた。防波堤の滑動後の復旧開始滑動量は、0.1m～1.0mまでで設定した。

F港とS港の混成堤および消波ブロック被覆堤の50年間の期待被害額を算出した。F港とS港の混成堤の計算結果を図-18、消波ブロック被覆堤を図-19に示す。混成堤、消波ブロック被覆堤と

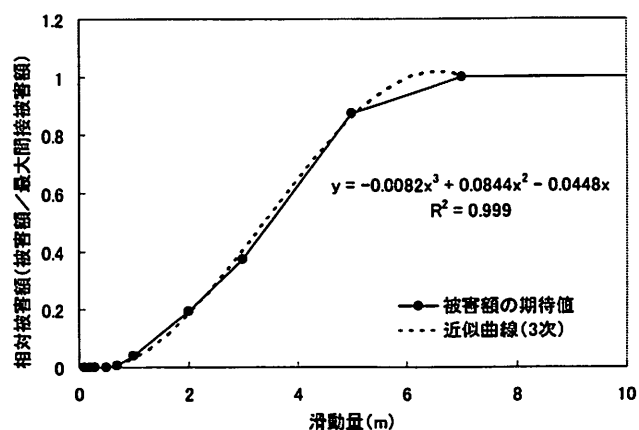


図-16 間接被害額算定モデル

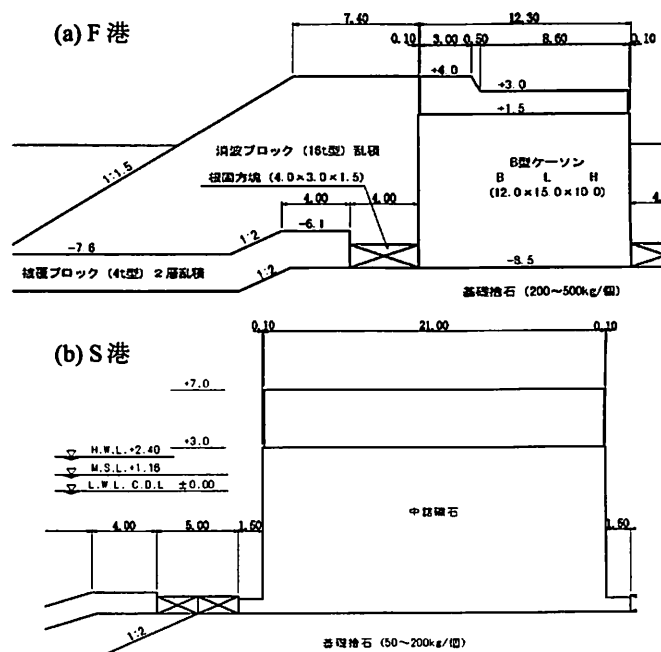


図-17 断面図

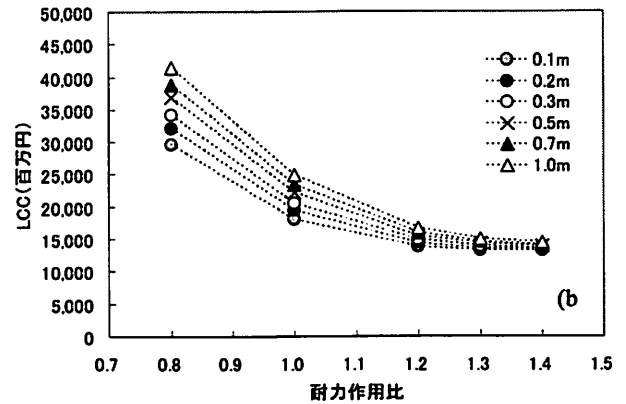
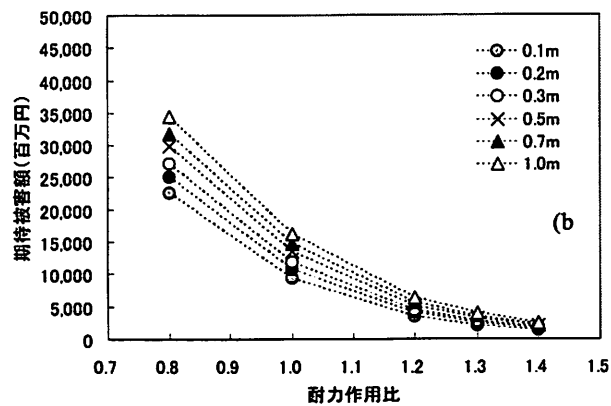
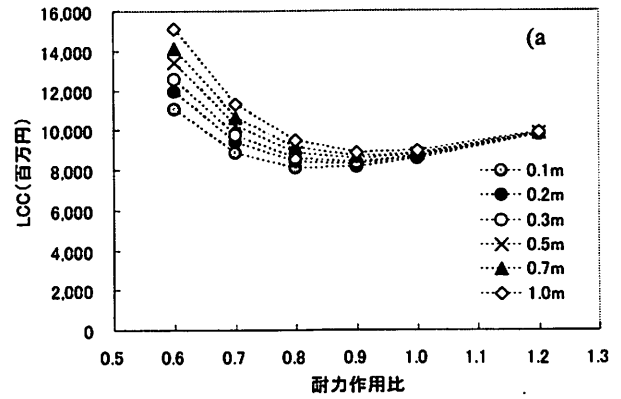
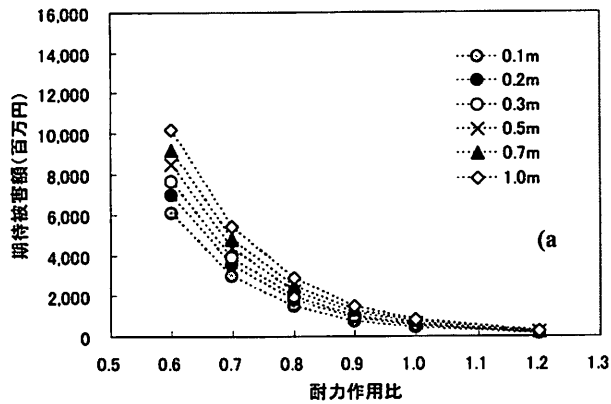


図-18 耐力作用比と期待被害額の関係（混成堤）

図-20 耐力作用比と LCC の関係（混成堤）

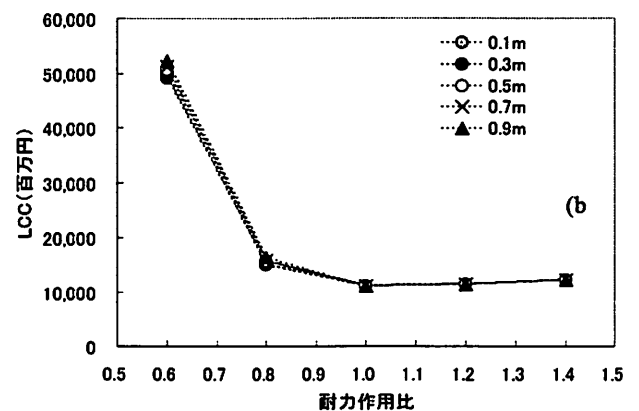
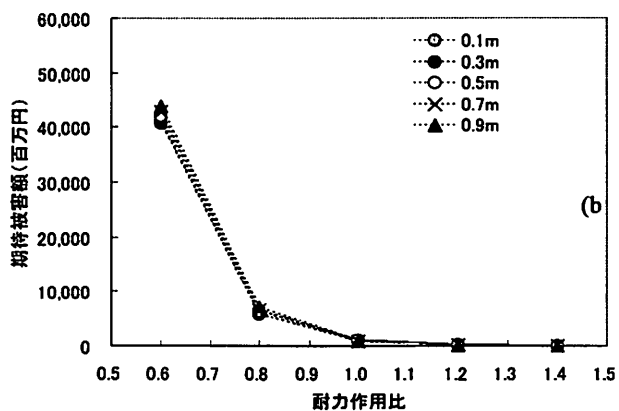
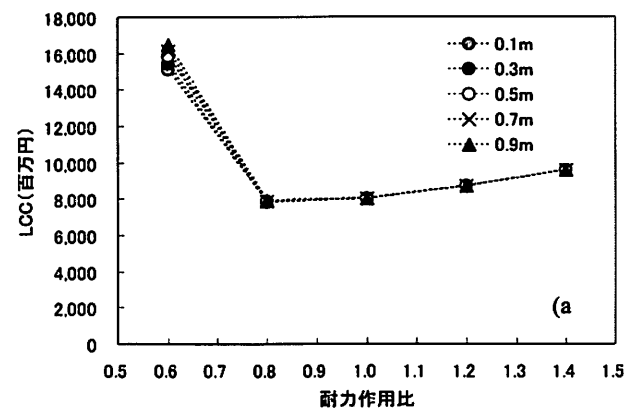
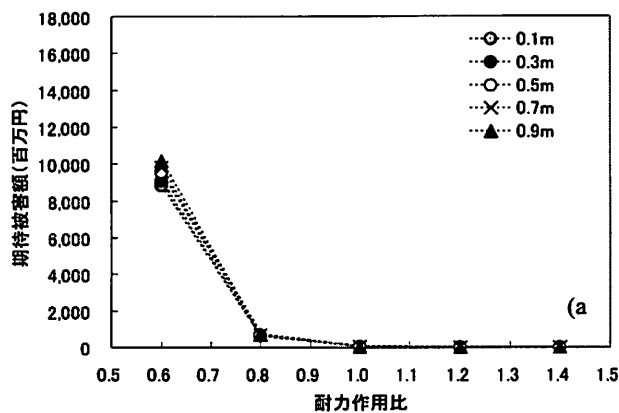


図-19 耐力作用比と期待被害額の関係(消波ブロック被覆堤)

図-21 耐力作用比と LCC の関係(消波ブロック被覆堤)

も、耐力作用比が大きくなるに伴い、期待被害額は小さくなっている。混成堤では、耐力作用比が小さい時に、復旧開始水準による期待被害額のばらつきが大きくなるが、消波ブロック被覆堤では、復旧開始水準による期待被害額の差は小さい。

初期建設費と期待被害額を加えてLCCを算出した。F港とS港の混成堤と消波ブロック被覆堤の耐力作用比とLCCの関係をそれぞれ、図-20、図-21に示す。混成堤に関しては、F港：耐力作用比0.8、S港：耐力作用比1.3がLCCで最小となり、目標とすべき耐波安定性水準となった。また、消波ブロック被覆堤では、F港：耐力作用比0.8、S港：耐力作用比1.0がLCC最小値となった。

混成堤は、消波ブロック被覆堤に比べて、初期建設費は安い、期待被害額が大きいため、LCC最小となる耐力作用比は、消波ブロック被覆堤と同じか、それよりも大きい傾向がある。また、間接被害額の最大値が小さいF港では、耐力作用比が1.0を下回る0.8でLCC最小となり、間接被害額の最大値が大きいS港では、耐力作用比1.3や1.0でLCC最小となり、代替港までの距離や取扱貨物数によっても目標とすべき耐波安定性水準が大きく変わる。

港湾基準による安全性水準（耐力作用比：1.0）はLCC最小の水準とは必ずしも一致しないことがわかった。

6. 防波堤の信頼性設計の今後の展開－おわりに代えて

本稿では防波堤の信頼性設計法について述べた。既に述べたように、部分係数法による信頼性設計は港湾基準に導入されている。しかしながら、この方法では防波堤が安定かどうかの判定を行えるのみである。性能設計体系における設計法としてよりふさわしい方法としては、波浪の作用による防波堤の変形量を照査し、それを確率的に制御する信頼性設計法が求められるといえる。

その際に問題となるのは、現状の変形量照査法が滑動破壊モードに限られているということであろう。防波堤が波浪作用を受けて変形するとき、単に防波堤ケーソンが基礎マウンドの上を滑っていくだけではなく、ケーソンがマウンドに貫入し、傾斜を伴いながら変形することが数多くの水理模型実験結果などから知られている（例えば、28）。図-22はこのような例を示すもの

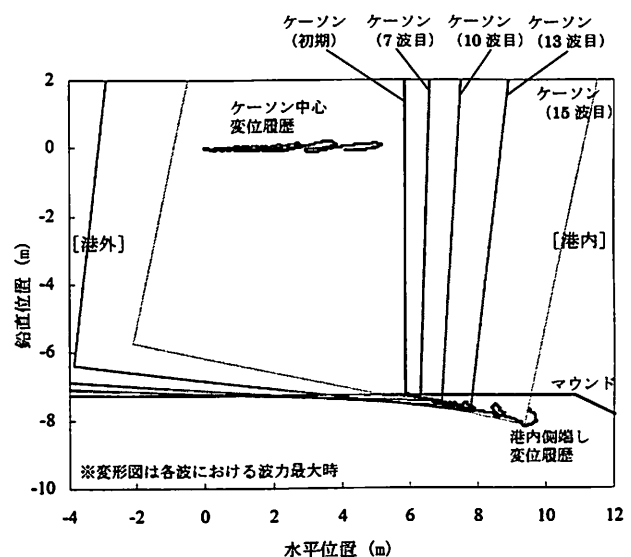
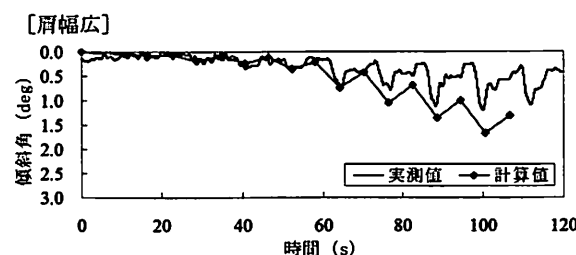
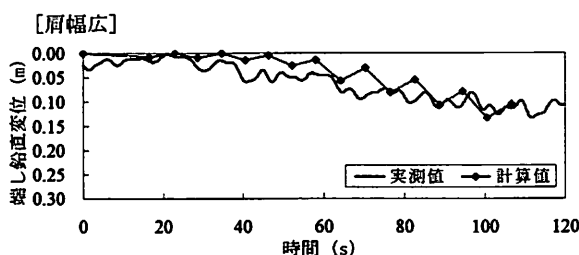
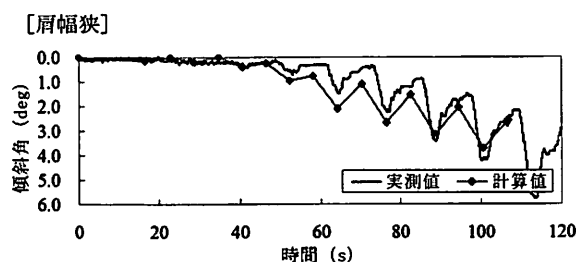
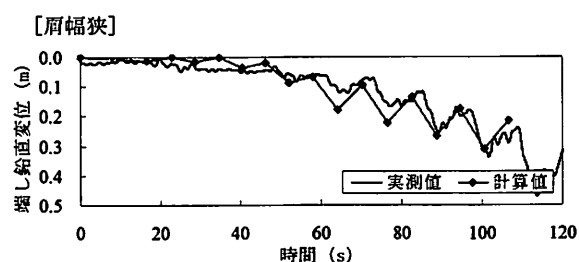
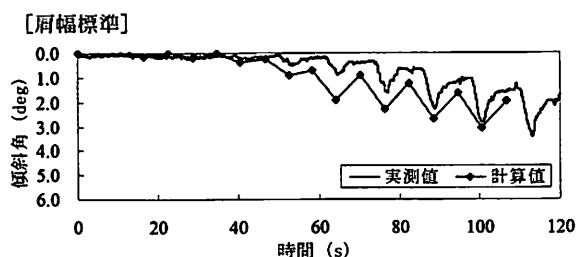
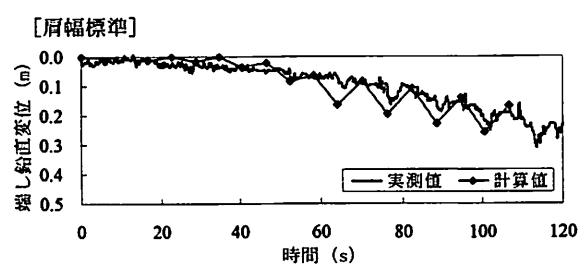


図-22 水理模型実験におけるケーソン変形図²⁸⁾

で、波浪の繰り返し作用により、ケーソン中心は水平方向に滑動しているものの、ケーソンは傾斜を伴いながらケーソン端しがマウンドに貫入していることが分かる。防波堤の信頼性設計法の合理化においては、このような複雑なケーソンの変形挙動をより精度良く再現する手法を構築し、その手法と確率的破壊制御法である信頼性設計法を融合させる取り組みが必要であろう。

地盤ばねモデルを用いて、図-22に示したようなケーソンの傾斜や端しの変形量を評価する手法も提案されており²⁹⁾、今後は従来より用いられている滑動モードと併せて、こうしたモードを考慮した信頼性設計が必要であろう。即ち、滑動・転倒・支持力というモードではなく、滑動量・傾斜量・端し沈下量を確率的に照査する設計体系の構築が必要ということである。



(a)港内側端し鉛直変位時刻歴

(b)ケーソン傾斜角時刻歴

図-23 地盤ばねモデルによるケーソン変形推定精度²⁹⁾

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)長 尚: 基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂, 1995
- 3)Melchers, R. E.: Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- 4)Haldar, A. and Mahadevan, S.: Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000
- 5)国土交通省港湾局監修, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007
- 6)Box, G. E. P. and Muller, M. E.: A note on the generation of normal deviates, Ann. Math. Stat., 29, pp.610~611, 1958
- 7)長尾 毅, 吉岡 健, 尾崎竜三: 防波堤の滑動量に関する破壊確率の算定精度向上に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.941-945, 2008
- 8)Hohenbichler, M., Rackwitz, R.: Improvement of Second-Order Reliability estimates by Importance Sampling, Journal of Eng. Mech., ASCE, 114, 12, pp.2195~2199, 1988
- 9)手塚集他: 計算統計 I, 確率計算の新しい手法, 統計科学のフロンティア, 岩波書店, 2005
- 10)Cornell, C. A.: A probability based structural code, Journal of the American Concrete Institute, 66(12), pp.974~985, 1969
- 11)Hasofer, A. M. and Lind, N. C.: Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111~121, 1974

- 12) Rackwitz, R. and Fiessler, B. : Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computers & Structures, Vol. 9, pp.489~494, 1978
- 13) Nataf, A. : determination des distribution don't les Marges sont Donnes, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, 225, pp.42~43, 1962
- 14) 吉岡 健, 長尾 毅 : 重力式防波堤の外的安定に関する部分係数のコードキャリブレーション, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.779-784, 2005
- 15) 長尾 毅 : ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の適用, 土木学会論文集 No.689, I-57, pp.173-182, 2001.
- 16) Owen, D. B. : Tables for computing Bivariate Normal Probabilities, Ann, Math. Stat., Vol.27, pp.1075-1090, 1956.
- 17) 下迫健一郎, 高橋重雄 : 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, Vol.37, No.3, pp.3-30, 1998.
- 18) 谷本勝利, 古川浩司, 中村廣昭 : 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, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.846-850, 1996
- 19) 長尾 毅 : 重点サンプリング法を用いたモンテカルロシミュレーションによる防波堤の累積滑動量に対する破壊確率評価の効率化に関する研究, 構造工学論文集 Vol.55A, pp.236-248, 2009
- 20) 吉岡 健・長尾 毅 (2004) : ケーソン式防波堤のライフサイクルコスト最小化法に関する一考察, 海岸工学論文集第 51 巻, pp.871-875.
- 21) 高山知司・安田誠宏・辻尾大樹・井上順一 (2009) : ライフサイクルコストの最小化による沿岸構造物被覆材の最適設計, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 1, pp.15-30.
- 22) 宮田正史・熊谷健蔵・辻尾大樹・大久保 陽介 (2009) : 消波ブロック被覆堤の期待補修費を考慮した維持管理手法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 65, No. 1, pp.911-915.
- 23) 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2010) : 平面的な被災を考慮した消波ブロック被覆堤の維持管理手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 66, No. 1, pp.836-840.
- 24) 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2011) : 防波堤の目標耐波安定性水準の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 67, No. 2, pp.I_781-I_785.
- 25) 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵・石河雅典 (2012a) : ライフサイクルコストの観点による混成堤の目標耐力作用比に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 68, No. 2, pp. I_294-I_299.
- 26) 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2012b) : 防波堤の目標耐力作用比に関する簡易推定手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol. 68, No. 2, pp.I_876-I_880.
- 27) 長尾 毅・辻尾大樹・熊谷健蔵 (2013) : ライフサイクルコスト最小化の観点による既設防波堤の最適な復旧水準に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) .
- 28) 長尾 毅, 橋本 淳 : 水理模型実験結果によるケーソン式混成堤の波浪による変形特性に関する一考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol. 67, No. 2, pp.I_136-I_141, 2011
- 29) 長尾 毅, 橋本淳 : 地盤ばねモデルを用いた防波堤の支持力性能照査法に関する一考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol.68, No.2, p. I_846-I_850, 2012