

平成17年10月31日
「港湾の施設の技術上の基準」
の改正に向けた勉強会
資料-2

性能設計と信頼性設計について (案)

国土交通省 国土技術政策総合研究所
独立行政法人 港湾空港技術研究所

港湾基準の性能規定化について（案）

1. 港湾基準における性能設計の階層

港湾基準では、港湾の施設の性能設計を目的、要求性能、性能規定、性能照査の4つの階層に分類する。ここで目的とは、当該施設を必要とする理由である。要求性能とは、目的を達成するために当該施設が保有しなければならない性能である。性能規定とは、要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定であり、具体的に照査が可能なように詳細に規定したものである。性能照査とは、目的、要求性能、性能規定に対して、数値解析、模型実験などの適切な手法によって、その性能が満足されることを照査することである。

性能の階層と港湾基準体系の関係を図-1に示す。ここで港湾基準体系は、法的な拘束力を有するかどうかによって基準と附属書に分類される。基準には、目的・要求性能・性能規定が規定され、性能照査手法の具体的仕様については基準の対象外となる。すなわち、具体的な性能照査手法や許容される破壊確率、変形量等の限界値の設定は設計者の判断に委ねられることになる。ここで設計者が行う性能照査には照査アプローチAと照査アプローチBの2つの考え方がある。附属書には、設計者の助けとなるように、照査アプローチBにおける基本設計コードとして、性能照査方法の標準的な考え方や最低限度の限界値等を例示する。設計者は施設的设计にあたって、照査アプローチAかBかを自由に選択することができる。

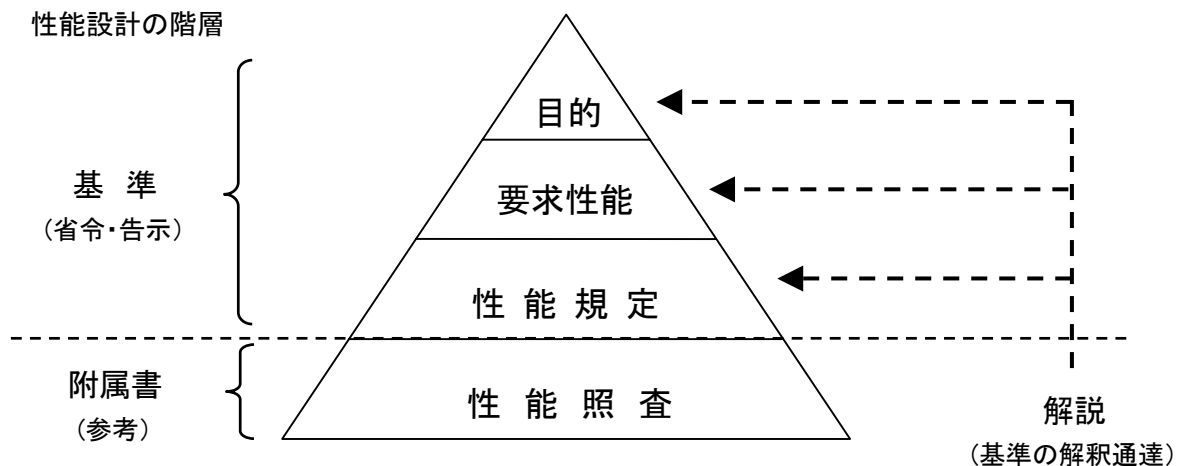


図-1 性能設計の階層と港湾基準体系

表-1 土木学会の包括設計コードによる性能照査のアプローチ

照査アプローチA	設計者は、性能規定を一定のある適当な信頼性で満足することを示す。
照査アプローチB	設計者は、当該構造物の事業者が指定する固有基本コード等に基づいて性能を照査する。

2. 要求性能と性能規定の基本的な考え方

(1) 要求性能

要求性能とは、目的を達成するために施設が保有しなければならない性能であり、「基本的要求性能」と「その他の要求性能」に整理される。「基本的要求性能」は、作用に対する施設の構造的な応答（変形、断面力等）に関する性能とし、さらに、施設の重要度や機能に応じて、安全性、修復性、使用性に分類

される（表-2 参照）。また、「その他の要求性能」では，施設の供用および利便性の観点から必要とされる構造的な諸元等に関する性能として供用性をはじめ，施工性，維持管理性，環境性等が規定される。

表-2 基本的要求性能

安全性	非常に大きな損傷が発生するものの，損傷の範囲が人命や背後圏の財産に甚大な影響を及ぼさないこと
修復性	ある程度の修復が必要となるが，比較的短期間のうちに機能を再び発揮することが可能であること
使用性	僅かな修復を行うことによりすみやかに機能が発揮できること

(2)作用と設計状態

性能照査にあたり考慮すべき作用の組合せに対応する設計状態は，永続状態，変動状態（概ね年超過確率 0.01 程度以上の作用が主たる作用の状態）および偶発状態（概ね年超過確率 0.01 程度以下の作用が主たる作用の状態）とする（図-2 参照）。なお，作用の分類（表-3 参照）に用いる年超過確率の値は便宜的に定めたものであり，限定的なものではない。図-3 にしめすように，港湾の施設に求められる性能としては，基本的に永続状態と変動状態に対しては使用性，偶発状態に対しては，施設の機能や重要度に応じて，安全性，修復性，使用性のいずれかひとつの性能が要求される。ただし，施設の機能と重要度によっては偶発作用に対する性能が求められないこともありうる。

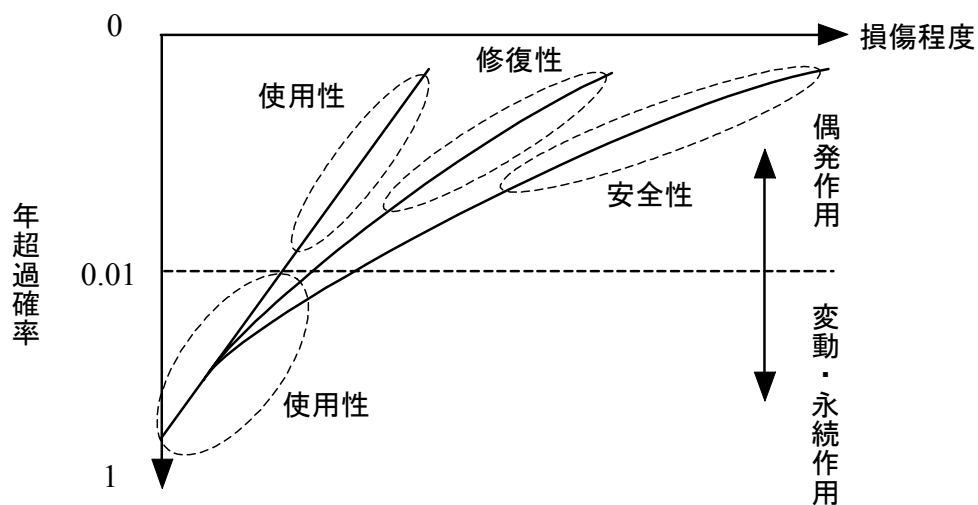


図-2 施設に要求される性能の概要

表-3 主な作用の分類

	定義	施設に求められる性能
永続作用	自重, 土圧, 温度応力, 腐食・凍結融解などの環境作用等	使用性
変動作用	波浪, 風, 水位(潮位), 貨物・車両などによる載荷重, 船舶の接岸・牽引作用, レベル 1 地震動等	使用性
偶発作用	接岸以外の船舶等の衝突, 火災, 津波, レベル 2 地震動, 偶発作用の波浪等	使用性, 修復性, 安全性

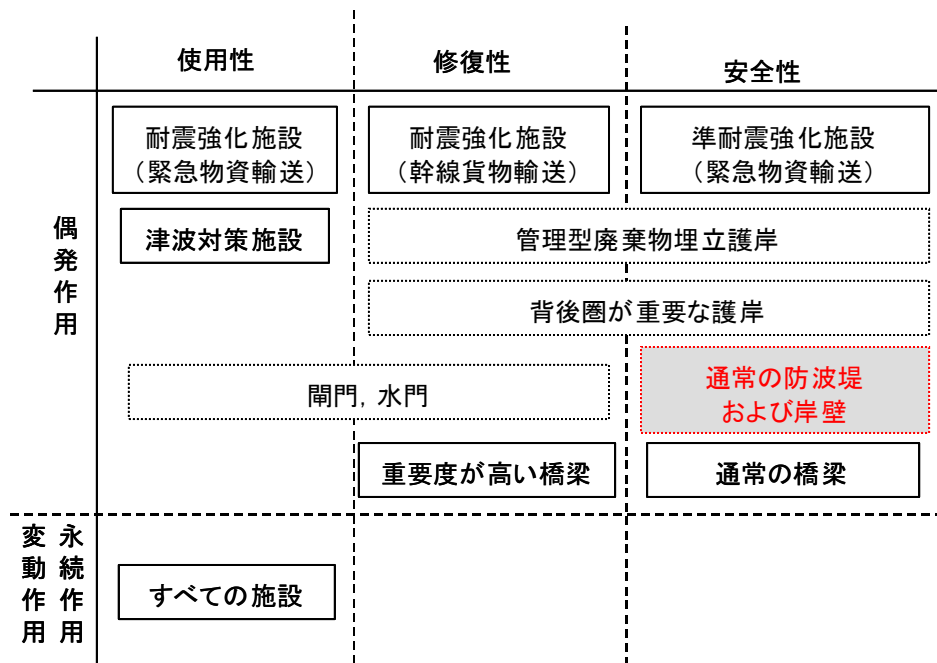


図-3 施設ごとの基本的要求性能

(3)性能規定

上述の通り、性能規定とは、要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定であり、具体的な照査が可能なように詳細に規定したものである。港湾基準に定めた性能規定は、公共の福祉の観点から最低限度満足すべき規定を照査の観点から定めており、照査において考慮すべき時間の影響、作用の組合せが明記されている。

3. 性能照査の基本

港湾基準では、施設の性能照査に用いられる手法に関する具体的な仕様の規定は行わないが、許容される性能照査手法としては、信頼性に基づく方法、施設の作用応答を適切に評価しうる数値解析手法、模型実験、あるいは過去の経験等に基づく手法が考えられる。設計者は、これらの手法を適宜選択し、適切に性能照査を行う必要がある。

設計状態ごとに想定される標準的な手法として、表-4 に示すように、永続状態または変動状態に対する照査は、耐力と作用効果の設計用値を信頼性に基づいて比較する手法を用いてよい。偶発状態に対

する照査は施設の変形量や損傷程度などを具体的に評価しうる手法を用いなければならない。図-4 に防波堤について、新設計法の基本的枠組みを例示する。

表-4 推奨される性能照査手法

設計状態	主たる作用	推奨される性能照査手法
永続状態 変動状態	自重, 土圧, 水圧, 載荷重, 波浪, 風, 船舶による作用等	・信頼性設計法
	レベル1 地震動	・信頼性設計法 ・地盤-構造物の動的相互作用を考慮した非線形地震応答解析 ・簡易法(震度法)
偶発状態	レベル2 地震動, 津波, 船舶の衝突, 偶発作用としての波浪等	・数値解析法(変形量や損傷程度を具体的に評価)

基準（省令・告示）

・目的（施設を必要とする理由）

防波堤は、水域施設の静穏度を維持し、荷役の円滑化、船舶の航行及び停泊の安全、並びに港内施設の保全を図ることを目的とする。



・要求性能（目的を達成するために施設が保有すべき性能）

防波堤は、波浪に関する変動状態に対して、構造部材が健全であり、安定性が確保されていること。



・性能規定（要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定）

混成堤は、波浪に関する変動状態に対して、上部工および直立部の滑動および転倒、基礎地盤の支持力不足による破壊により、安定性が損なわれる危険性が限界値以下であること。

[設計供用期間、設計状態、重要度を考慮した規定]



解説（基準の解釈通達）

[考慮すべき作用・許容される限界値]

- ・波浪に関する変動状態の照査において考慮すべき作用は、主たる作用を波浪、従たる作用を自重および水圧とする。
- ・波浪に関する変動状態における直立部の滑動、転倒及び基礎地盤の支持力破壊に関する安定性が損なわれる危険性の標準的な限界値については、システム破壊確率の限界値を 8.7×10^{-3} とすることができる。これは、再現期間 50 年の波浪の作用に対する力の釣り合いに基づくシステム破壊確率であり、過去の設計法による防波堤が有する平均的な安全性水準である。なお、限界値の設定方法については、複数の方法が考えられるため、適切な検討に基づき、設定してもよい。



附属書（参考）

[計算式・係数の例示]

- ・滑り出しに対する安定の検討は、次式によって行うことができる。

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{wi} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{pu} P_{uk} \right) \geq \gamma_{pH} P_{Hk}$$

- ・混成堤の標準的なシステム破壊確率の限界値 8.7×10^{-3} に対する部分係数の値は、表の数値を用いてよい。

図-4 新設計法の基本的枠組み（防波堤）

信頼性設計法（案）

1. 信頼性設計法の概要

信頼性設計法は施設の破壊可能性を確率論に基づく手法によって制御する方法であり、その制御方法に応じて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制御される（表-1参照）。

レベル3信頼性設計法の制御に用いられる破壊確率の算出にあたっては、一般に、性能関数にもとづいて同時確率密度関数を求め、これを多重積分する必要がある。しかしながら、同時確率密度関数の定式化や高次の多重積分の実行などは困難を伴う場合があり実用的ではないことが多い。このため、破壊確率を数値的に計算するモンテカルロシミュレーション¹⁾などの手法が用いられるが、その場合にも、計算負荷の軽減の観点からインポートランスサンプリング²⁾等の破壊確率を効率的に算出できる手法の採用が一般的になっている。また、レベル2信頼性設計法の制御に用いられる信頼性指標は、図-1に示すように破壊をもたらす破壊点（ $Z=0$ 、 Z ：性能関数）から性能関数の平均値がどの程度離れているかを示す尺度であり、1次信頼性理論（FORM: First-Order Reliability Method）に基づき算出される¹⁾。一方、レベル1信頼性設計法においては、特性値と部分係数を乗じて得られる設計用値を算出し、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性能照査が行われる。

表-1 信頼性設計法の3つのレベル

設計水準	安全性照査式	制御パラメータ
レベル3	$P_{f_T} \geq P_f$	破壊確率
レベル2	$\beta_T \leq \beta$	信頼性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$	設計用値

いずれの方法を選択するにせよ、信頼性設計法により安定性を正しく定量評価するためには、性能照査を行う際に介在する様々な不確定要因すなわち設計因子の従う確率分布を適切に定める必要がある。さもなければ、算出した破壊確率や信頼性指標は工学的意味を持たない。さらに、信頼性設計法の適用により設計の合理化や建設コスト縮減を推進するためには、設計に最も影響を及ぼす支配因子の推定精度向上を目指す必要がある。なぜならば、構造物の破壊確率 P_f には、設計因子の平均値に加えて、その標準偏差が影響するからである（図-1）。そのためには、まず支配因子の特定が必要であり、その手段として感度係数による評価が極めて有効である。ここで、感度係数とは、2. 感度係数と部分係数で詳述するように、構造物の安全性に各設計因子が及ぼす感度または重要度を表す指標である。また信頼性指標と感度係数は、レベル1信頼性設計法における部分係数の算定に用いられることから、これらを定量評価しておくことの工学的意義は大きい。

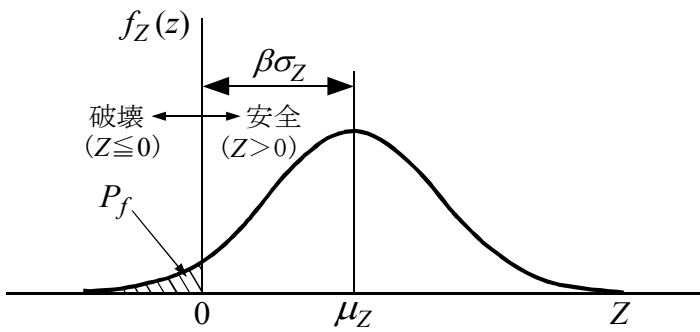


図-1 信頼性指標 β

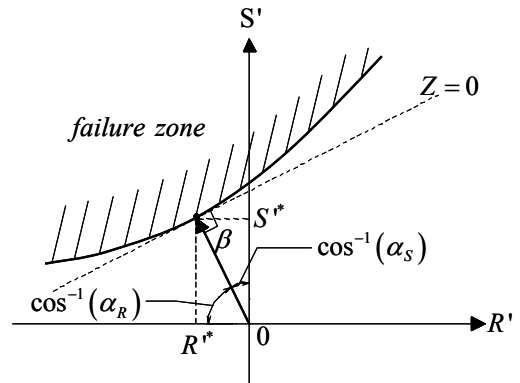


図-2 信頼性指標 β と感度係数 α

2. 感度係数と部分係数

信頼性指標は、標準化空間（平均値 0，分散 1 となる標準正規化空間）における原点から破壊点までの距離を表し（図-2），その値が大きいほど安全であることを示す。信頼性指標の算出方法は、平均値周りの線形化近似に基づく Cornell タイプ³⁾と、破壊点周りの線形化近似に基づく Hasofer-Lind タイプ⁴⁾に大別される。評価精度としては、破壊点周辺の近似精度を高めた Hasofer-Lind タイプの信頼性指標の方が安全性を正確に評価できることが知られており¹⁾，正規分布に従う確率変数間に相関がない場合には式(1)によって定義される。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (1)$$

ここに、

Z ：性能関数

X^* ：確率変数 X の破壊点における値

μ ：平均値

σ ：標準偏差

式(1)における破壊点 X^* は一意的には定まらないため，収束計算によって算出される。

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り，確率変数間に相関がない場合には，式(2)によって定義される。

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

ここで、

$$X_i' = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (3)$$

式(3)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し、性能関数が $Z=R-S$ (R : 耐力, S : 作用効果) によって定義される場合には、図-2 に示す関係となる。感度係数は、確率変数間に相関がない場合には、耐力に対しては正值、作用効果に対しては負値となり、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(4)、式(5)で表される⁵⁾。

$$\sigma_Z' = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} \sigma_{X_i}} \quad (4)$$

$$\alpha_i' = \sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} / \sigma_Z' \quad (5)$$

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、以上に述べた信頼性指標および感度係数を用いて、式(6)により算出することができる。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (6)$$

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/X_k : 確率変数 X の平均値の偏り (平均値と特性値の比)

一方、確率変数 X が対数正規分布に従う場合、部分係数は式(7)によって算出される。

$$\gamma_X = \frac{\exp\left(-\alpha_X \beta_T \sqrt{\ln(1+V_X^2)}\right)}{\sqrt{1+V_X^2}} \frac{\mu_X}{X_k} \quad (7)$$

式(6)、式(7)に示すように、部分係数は設計因子の推定精度、感度係数、目標信頼性指標をもとに設定されている。今後、研究の進展、新素材の開発等の理由により設計因子の推定精度が向上する場合やライフサイクルコスト等の観点から目標安全性水準が変化する場合がありますと考えられる。そのような場合、設計因子の感度係数は変化するため、部分係数を適切に設定する必要がある。その場合の部分係数の設定方法としては、以下の方法が考えられる。

- ① 信頼性の変化前の感度係数をそのまま用いて部分係数を修正する方法
- ② 信頼性の変化に対応して部分係数を修正する方法⁶⁾
- ③ 再度キャリブレーションを実施して部分係数を設定する方法

適切な部分係数の設定という観点からは、③の手法が最も望ましいが、簡便でありながら、合理的な設計の可能な②の手法⁶⁾や、最も簡便な①の手法を適用することもできる。

3. 目標安全性水準の設定方法と附属書における目標信頼性指標・部分係数の設定

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、以下のようなものがある¹⁾。

- ① 事故統計に基づく方法
- ② 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
- ③ 他の災害危険性との比較による方法
- ④ 人的損失に対する危険性回避に要する投資効果による方法
- ⑤ ライフサイクルコスト最小化に基づく方法

これらの手法の港湾の施設への適用性を検討する⁷⁾と、①事故統計に基づく方法は、ヒューマンエラーによることが多い事故統計と波浪や地震の作用等の様々なレベルの異なる作用による破壊確率を整合させることには問題がある。③他の災害危険性との比較による方法、④人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法は、施設の被災によって人的損失が直接的に生じる可能性の高い施設を念頭において提案されたものであるため、港湾の施設への適用性は高くない。

このような観点も考慮して、附属書における目標安全性水準の設定方法としては、パラメータの従う確率分布が明らかで照査手法と破壊のメカニズムが調和的である場合は、一般に、②過去の基準類へのキャリブレーションに基づく方法⁷⁾を用いるものとする。ただし、⑤ライフサイクルコスト最小化に基づく方法を否定するものではない。

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っては、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(8)により示される。

$$ELC = C_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{f_j}}{T} C_f R \quad (8)$$

$$R = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^{k-1}} \quad (9)$$

$$E_{f_j} = v_j T P_{f_j} \quad (10)$$

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

v_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-3 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従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。

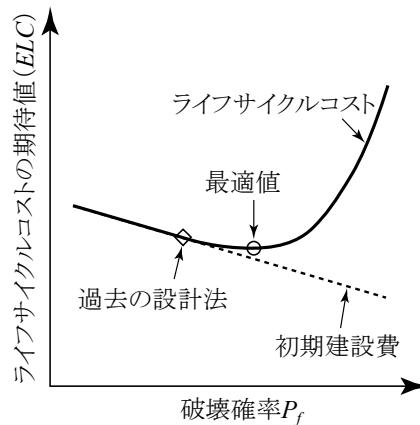


図-3 ライフサイクルコスト最小化に基づく方法

永続状態に対する係留施設等の性能照査にあつては、パラメータの従う確率分布が明らかで、照査手法と破壊メカニズムが調和的であるが、②によることは必ずしも適切ではないものといえる。これは、構造形式ごとに複数の破壊モードが存在し、かつ、破壊モードごとに過去の設計法における設定の差に起因する安全性水準のばらつきが大きいと考えられること⁸⁾、さらに、円弧すべり破壊モードのようにすべり円弧の大小によって影響を受ける地盤強度の自己相関性に起因して、過去の設計法の安全性水準が大きくばらつくこと⁹⁾などが考えられるためである。また、⑤の採用にあたっては、永続状態の係留港湾等については、複数の年超過確率の作用を考慮する必要がないため、初期建設費と破壊による復旧費用の期待値の和で表現される期待総費用を指標として、これが最小となる破壊確率を最適値と判断する方法を用いて照査することが考えられる。この場合、期待総費用は式(11)により得られる。

$$ETC = C_i + P_f C_f \quad (11)$$

ここに、

ETC : 期待総費用

C_i : 初期建設費

P_f : 対象とする作用による破壊確率

C_f : 破壊時費用

このほか、パラメータの従う確率分布が不明であるか、または照査手法と破壊メカニズムが必ずしも調和的でない場合は、過去の設計法における設定を考慮して部分係数を定めている。

以上、述べた設定方法を施設別に表-2にまとめる。

表-2 主要な施設の目標信頼性指標・部分係数の設定方法

施設	設計状態	破壊モード	目標信頼性指標，部分係数の設定方法
重力式防波堤	永続状態	基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
	波浪に関する変動状態	堤体の滑動 堤体の転倒 基礎地盤の支持力	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
重力式係船岸	永続状態	壁体の滑動 壁体の転倒 基礎地盤の支持力 基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	壁体の滑動 壁体の転倒 基礎地盤の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法
矢板式係船岸	永続状態	矢板の根入れ長 矢板の応力 タイ材の応力 基礎地盤の円弧すべり	期待総費用最小化に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	控え工の応力（支持力） 矢板の根入れ長 矢板の応力 タイ材の応力 控え工の応力（支持力）	過去の設計法における設定に基づく方法
セル式係船岸	永続状態	せん断変形 滑動 セル殻の応力 アーチの応力	過去の設計法における設定に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	滑動	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
栈橋	船舶による作用に関する変動状態	杭の応力（杭頭の縁部降伏）	期待総費用最小化に基づく方法
		杭の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法
	レベル 1 地震動に関する変動状態	杭の応力（杭頭の縁部降伏）	過去の設計法の平均的な安全性水準に基づく方法
		杭の支持力	過去の設計法における設定に基づく方法

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) 例えば，吉田郁政，鈴木修一：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，Vol.43B，pp.269～276，1999
- 3) Cornell, C. A. : A Probability-Based Structural code, Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No.12, pp.974～985, 1969
- 4) 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

- 5) 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計，山海堂，1995
- 6) 吉岡 健，長尾 毅：信頼性の変化に対応した部分係数の設定方法，構造工学論文集 Vol.51A，pp.401～412，2005
- 7) 長尾 毅：ケーソン式港湾構造物への信頼性設計法の適用に関する研究，京都大学学位論文，2001
- 8) 長尾 毅，柴崎隆一，尾崎竜三：経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル1信頼性設計法，構造工学論文集 Vol.51A，pp.389-400，2005
- 9) 尾崎竜三，長尾 毅：防波堤を対象とした円弧すべりに関する信頼性設計法の適用，海洋開発論文集 第21巻，pp.963～968，2005