

港湾構造物の技術基準の改訂動向

REVISION OF THE TECHNICAL STANDARDS FOR PORT AND HARBOUR FACILITIES
TOWARDS PERFORMANCE AND RELIABILITY BASED DESIGN長尾 毅
Takashi NAGAO

ABSTRACT The present paper summarizes the author's view on the revision of the technical standards for port and harbour facilities in Japan. From the viewpoint of the harmonization with the international codes such as ISO2394, the level-1 reliability based design method using partial safety factors is regarded as the standard design method for the next generation of the technical code. The necessity of code calibration on reliability theory is stressed. An example of code calibration is shown.

KEYWORDS : 性能設計, 信頼性設計, 港湾構造物
performance based design, reliability based design, port and harbour facilities

1. まえがき

港湾構造物の設計は、「港湾の施設の技術上の基準（以下、港湾基準）」に従って行われる。港湾基準は昭和54年に策定された後、平成元年、平成6年、平成11年の3度の改訂が行われた。このうち、平成6年の改訂は一部のみの改訂であり、全面的な改訂はほぼ10年おきに行われてきたといえる。

過去の改訂のうち、平成11年の改訂においては、性能設計に関する国内外の動向を踏まえつつも、時間的な制約もあり、基本的には仕様規定型の基準となっている。しかしながら、鉄筋コンクリート構造物の限界状態設計法の導入、係留施設（岸壁）のレベル2地震動に対する性能照査の考えの導入、および栈橋式岸壁の耐震性能照査などは盛り込まれた。

性能設計と同じく最近のホットな話題として、設計法の国際標準化があげられる。政府調達協定やTBT協定などを背景に、ISO規格などの国際規格との整合性・調和性が今後は強く求められるため、国際標準設計に対応した形の港湾基準の改訂が早急に必要となっている。このため我々は、2005年度末を目標に、港湾基準改訂に向けた取り組みを開始したところである。新基準のキーワードは性能設計と信頼性設計となると考えられる。本稿では、筆者の港湾基準改訂の基本的考え方についてとりまとめたが、今後各方面における議論により内容に変更がありえることをお断りしておく。

2. 現在の港湾構造物の設計の考え方

2.1 港湾基準の体系

現在「港湾基準」として認知されているものは日本港湾協会より発刊されている「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾である。同書に記載されている内容は、港湾基準（枠囲みの一部）、その解説、およびその参考である。このうち、強制力があるものは港湾基準のみであり、解説および参考は一切強制力を有するものではない（しかしながら、参考の部分まで強制力のある「基準」であると認識されている場合が多い）。現在の港湾基準において、例えば耐震設計に関する部分については、震度法における地域別震度、地盤種別係数、重要度係数は基準であるが、岸壁の設計法の詳細は基準ではない。

工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

次項では現行基準の耐震設計の考え方を述べるが、これは単に標準的に採用される方法について述べたものに過ぎないことに注意が必要である。

2. 2 港湾構造物の耐震設計

(1) 耐震設計の基本的考え方

レベル1地震動に対しては、所要の構造の安定を確保し、かつ当該施設の健全な機能を損なわないことが要求される。また、レベル2地震動に対しては、生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能の回復が可能なものとし、当該施設の所期の機能の保持が求められる。なお、レベル2地震動に対する上記の要求性能は、耐震強化施設に対してのみ求められる。

(2) 鋼材を用いた港湾構造物の耐震設計

港湾構造物のうち、鋼材を用いた構造物の代表的なものとしては矢板式岸壁と栈橋式岸壁があげられる。矢板式岸壁は図-1に示すように鋼矢板壁を土中に打ち込んで直立壁を構成し、背後に設置した控え工と矢板壁をタイ材により結合するものである。矢板式岸壁は抗土圧構造物であることから、震度法による静的な設計法が適用される。栈橋式岸壁は鋼管杭の上部にコンクリート製の上部工を施工し、背後地盤と渡版にて連絡する構造形式であり、栈橋本体と背後地盤は結合されていない。栈橋式岸壁の設計については保有水平耐力照査を骨子とした手法が導入されている。主要な項目としては、①耐震性能照査の考え方の位置付け②栈橋の動的応答特性を考慮した照査震度の設定③鋼管杭の塑性変形性能によるエネルギー吸収を考慮した水平保有耐力法の導入があげられる。

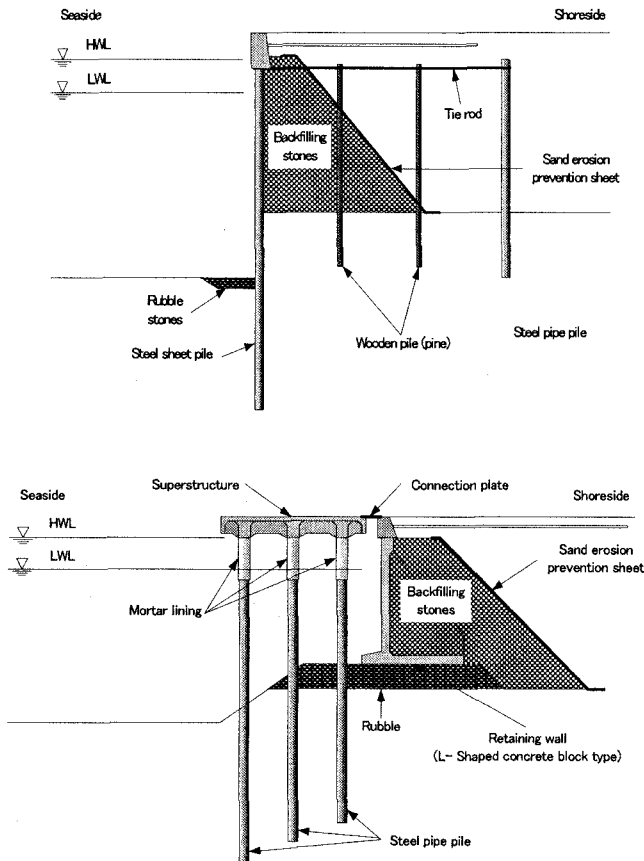


図-1 矢板式岸壁および栈橋式岸壁

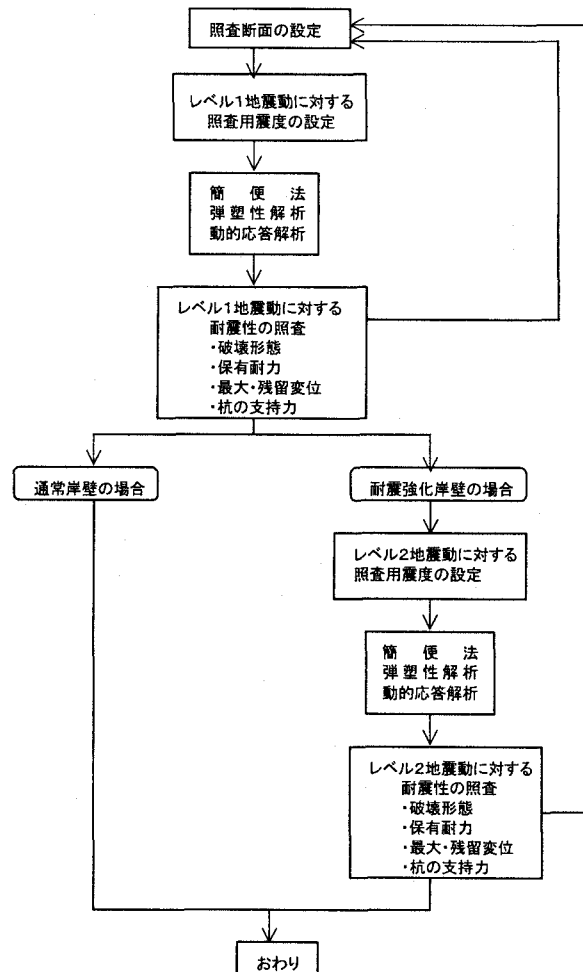


図-2 栈橋の耐震性能照査の流れ

3. 港湾基準改訂に向けた取り組み

3.1 性能設計

性能設計という用語と信頼性設計という用語が港湾技術者の間で一体的に使われる場合が多いようで、技術者間に若干の混乱があるように見受けられる。ここでは2つの用語の整理をしておきたい。

まず、性能設計とは、「構造物に要求する性能を明確にし、その性能を達成する設計法」ということができる。ここで、基準に従った設計行為を考えた場合に、要求性能が基準（＝強制）であり、基準（要求性能）を達成する方法（設計法）は設計行為に加担する者が独自の判断で選択できるスタイルを次期港湾基準では想定している。

その際に、強制力がかかるのは要求性能だけとなるため、この要求性能はできる限り明確に、定量的に示す必要があると考えられる。単に「～の荷重作用に対して安定であること」と示しただけでは、どのように安定であるのか不明であり、設計を行うことができないためである。要求性能としては、例えば、「耐用期間中の荷重効果による構造物のシステム破壊確率を 2×10^{-2} 以下にする」、
「ある特定の荷重効果により構造部材の幾つかは降伏するが、システム破壊は生じない」

といった性能を示す必要があると考えられる。次に要求性能を照査する際に、これを確定的に照査する方法と、確率的に照査する方法の2通りが考えられる。後者が信頼性設計法である。

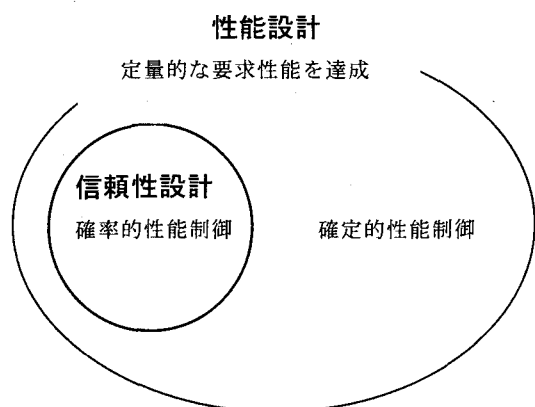


図-3 性能設計と信頼性設計

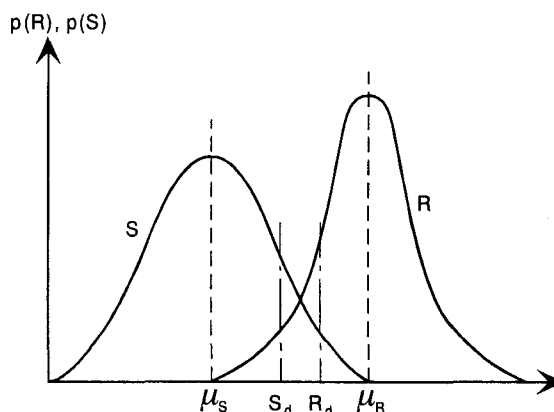


図-4 信頼性設計

3.2 信頼性設計

構造物の設計においては、耐力と荷重効果の値を何らかのモデルを用いて計算し、耐力が荷重効果を上回ることを確認する。従来の設計法では、耐力及び荷重効果を構成する因子の値をある値に確定的に定めて、確定的な耐力設計用値 R_d と荷重効果設計用値 S_d の値を比較して安全性照査を行うが、 R_d および S_d は、それぞれの確率分布における超過確率として定められたものではなかったため、設計される構造物の破壊に対する安全性が定量的に明確ではなかった（図-4）。こうした従来型の設計法に替わり、確率論を援用して構造物の破壊（損傷）する可能性を定量的に制御する方法が信頼性設計法である。信頼性設計法には3つのレベルがある²⁾（表-1）。もっとも用いられる頻度の高いものがレベル1の方法であり、ISO2394に位置付けられたのもこの方法である。なお、安全性指標とは破壊の可能性を表す指標で、この値が大きいほど安全であることを示す。

表-1 信頼性設計法の3つのレベル⁷⁾

レベル	安全性照査式	基準パラメータ
レベル3	$p_f \leq p_{fa}$	破壊確率
レベル2	$\beta \geq \beta_T$	安全性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$	設計用値

レベル1信頼性設計法の安全性照査式（性能関数）の基本を示すと式(1)のようになる。

$$\gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k \quad (1)$$

ここに、 γ_R ：耐力に関する安全係数、 γ_S ：荷重効果に関する安全係数、 R_k ：耐力の特性値、 S_k ：荷重効果の特性値

式(1)に分離係数 α_R 、 α_S を導入することにより、安全係数が式(2)～式(3)により得られる。ここに、分離係数は、FORM(First Order Reliability Method)を適用することにより性能関数の線形化近似を行う際に得られる値である。

$$\gamma_R = (1 - \alpha_R \beta_T \frac{\sigma_R}{\mu_R}) \frac{\mu_R}{R_k} \quad (2)$$

$$\gamma_S = (1 + \alpha_S \beta_T \frac{\sigma_S}{\mu_S}) \frac{\mu_S}{S_k} \quad (3)$$

ここに、 μ および σ は、その添字の変数に関するそれぞれ平均値および標準偏差であり、 β_T は目標安全性指標である。このように、レベル1の信頼性設計法では、構造物の破壊確率を直接扱った計算は行わないが、破壊確率が許容値以下になるように設定した安全係数を用いて設計計算を行うことによって、安全性をコントロールしている。

なおレベル2の信頼性設計法は、安全性指標の値そのものを判定基準とするものである。すなわち、設計される構造物の安全性指標を算出し、これが目標値を上回ることを確認する。

$$\beta \geq \beta_T \quad (4)$$

3. 3 港湾基準改訂の基本的考え方

上述したように性能規定型設計法においては、要求性能のみが基準として強制される内容となり、基準達成の方法は設計者（ないしは発注者）に委ねられることとなる。ただし、方法を一切示さないことは設計者の便を考慮すると現実的とはいえないであろう。したがって、標準的と考えられる設計法を参考として記述しておくスタイルが現実的と考えている。このため、信頼性設計法によるコードキャリブレーションの実施が必要である。

その際に最も重要な点は、確率論に基づいたキャリブレーションを実施すること、及びキャリブレーションされた設計法により要求性能が満足されることを合理的な指標を用いて示すことであると考えられる。形式的に、従来の設計法と同程度の断面になるように安易に部分安全係数を設定したのでは、信頼性設計法の合理性が発揮されることは無く、単に設計者の手間を増やしただけになってしまうことが懸念される。信頼性設計法の導入の意義は構造物の安全性のばらつきを減少させることであるが、形式的なキャリブレーションを行ったのでは、設計される構造物の安全性はそれ以前の設計法による場合の安全性と同程度にばらつくと考えられる。

さらに、信頼性設計法は与えられた性能関数の枠内で合理的な方法を与えるものであることに注意が必要である。性能関数がかならずしも実際の破壊メカニズムと調和的でない場合には、信頼性設計法の適用により設計が合理化される可能性は低いであろう。

今後の設計法の展望を示したものが図-5である。設計を標準的なものと特殊なものに大別して考える。ここで、特殊な設計とは、特に重要な構造物や特に安全性照査を綿密に行うことが要求される構造物の設計のことを指す。技術基準及びマニュアルが対象とするのは主に標準的な設計であり、標準的な設計は、レベル1信頼性設計法を中心とした性能設計に書き換えられることが期待される。特

殊な設計については，模型実験や高度な数値解析による確定論的な性能設計に加えて，レベル2以上の信頼性設計法の採用が期待される。

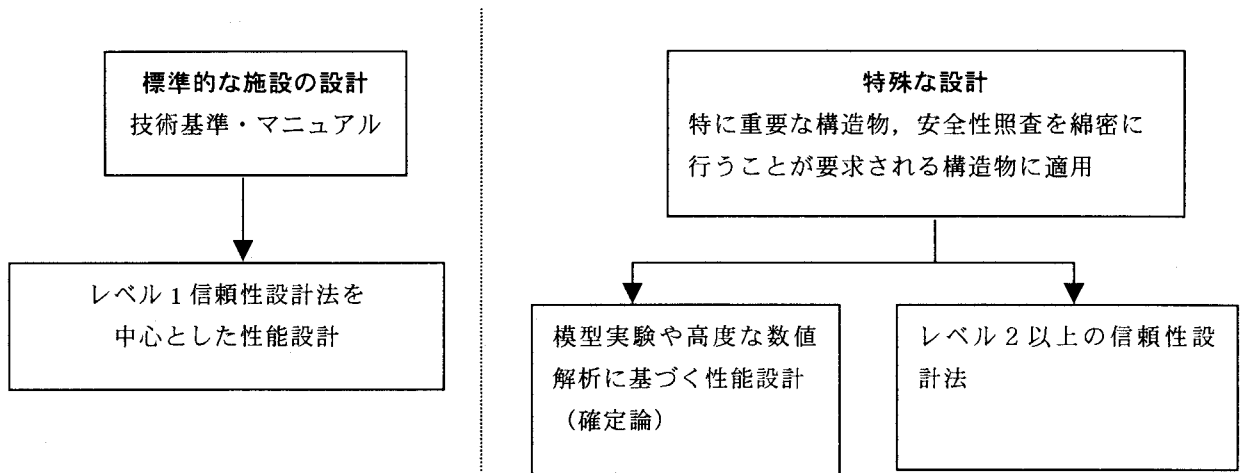


図-5 設計法の将来展望

3. 4 ケーソン式防波堤の外的安定への信頼性設計法の適用例^{4), 5)}

(1) 概要

レベル1およびレベル2の信頼性設計法によって防波堤の外的安定設計を行う手法を検討した例について紹介する。全国における防波堤の設計事例をもとに，現行設計法による安全性水準を滑動・転倒・支持力破壊の3つの破壊モードを考慮したシステム安全性指標により検討した。さらに，信頼性設計法によるコードキャリブレーションを行い，キャリブレーション結果の合理性を検証した。また，レベル1およびレベル2の方法の適用性の相互比較をあわせて行った。

(2) 現行設計法による安全性水準

防波堤の外的安定に関係する設計因子のうち，確率変数として扱うべき因子を抽出し，それぞれの従う確率分布を表-2のように推定した。基本的に各設計変数の平均値とその設計用値の比の値は正規分布に従うと仮定し，設計変数の平均値と設計用値の比の値 α と，変動係数 V によって分布を表している。水深変化の緩急は1/30以下の場合を緩勾配，1/30を超える場合を急勾配とする。波力関係のうち波浪変形計算精度，砕波変形精度，波力算定式推定精度は模型実験をもとに求められた確率分布であり，沖波波高推定精度は推定値である。潮位は過去過去50年間の全国の沿岸域における高潮に基づく既往最高潮位H.H.W.L.とさく望平均満潮位H.W.L.の比の値 r_{wl} の地域区分に従い分類した。

現行設計法による防波堤の外的安定水準を評価するため，近年の全国における防波堤の設計事例76例を地域的及び設計条件的に偏りのないように広範囲から収集した。滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードについて現行設計法に準じて性能関数を定義し，Hasofer-Lindタイプ³⁾の安全性指標を算出した。図-6に，滑動，転倒，支持力の各破壊モードに対する現行設計法の安全率と安全性指標の関係を示す。滑動または転倒については，安全率と安全性指標は概ね正の相関関係にあるが，支持力についてはばらつきが大きく，安全率より安全性指標を精度良く推定することは困難であることがわかる。3つの破壊モードに対応する安全性指標の相互の相関は低く，滑動がほとんどの断面で支配的なモードであることが分かった。この被災モードの傾向は，実際の被災傾向と整合的である。

次に，破壊モード相互の相関が低いことを考慮し，3つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率を，各モードを完全独立と仮定してシステム破壊確率を算出した。システム破壊確率をもとに算出されるシステム安全性指標の分布を図-7に示す。システム安全性指標は1.71~3.63の範囲にあり，平均値は2.41である。この値は，実際の防波堤の破壊事例より推定される平均的な安全性指標と調和的であり，システム安全性指標は適切に算定されたものと判断される。

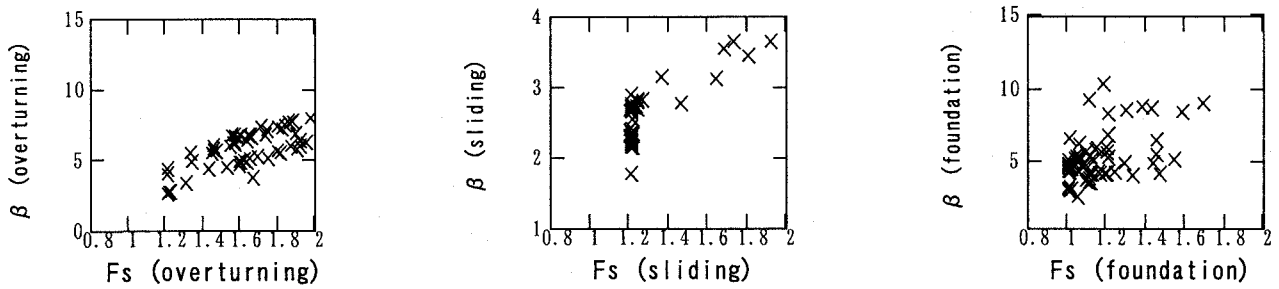


図-6 安全性指標と安全率の関係

表-2 設計因子の従う確率分布

	α	V
波力		
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-リン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
潮位		
$r_{wl}=1.5$	1.00	0.20
$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数	1.06	0.15
単位体積重量		
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	1.00	0.10

注) α : 平均値の偏り (平均値/設計用値)

V : 変動係数

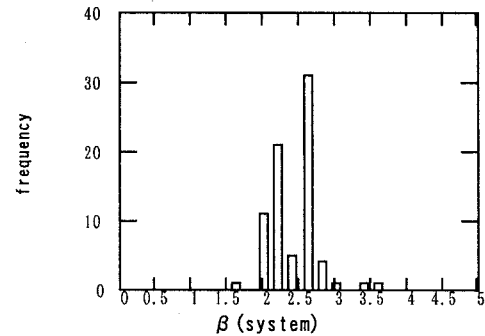


図-7 システム安全性指標の分布

信頼性設計法によるコードキャリブレーションにあたり、目標安全性水準の定め方としては、平均値設定のキャリブレーションにおいては破壊確率の平均値を目標値とし、最低水準設定のキャリブレーションにおいては、5%超過確率に相当する破壊確率(2.30×10^{-2})とする。この値は、システム安全性指標の分布に正規分布を当てはめて得られる5%非超過安全性指標1.99をもとにして設定した。また、防波堤はどのような破壊モードが生じても基本的には原型復旧されることから、目標安全性指標は各破壊モードに対して同じ値とする。

(3) レベル2 信頼性設計法によるキャリブレーション

レベル2 信頼性設計法においては本来、目標安全性指標をちょうど満足する設計を行うことが可能であるが、防波堤の外的安定においては破壊モードが複数あることから、卓越モード以外の安全性指標は目標値を上回るため、キャリブレーションを行って最適な目標安全性指標を設定する必要がある。レベル2 信頼性設計法の適用にあたり、2.00~2.55の範囲で0.05刻みで目標安全性指標を変化させてFORMを用いた試設計を行った。すべての破壊モードについて式(4)を満足する最小の堤体幅を算出し、その堤体幅に対する各破壊モードの安全性指標を算出し、これをもとにシステム破壊確率を算出する。得られた値に対して、平均値ベースのキャリブレーションにおいては式(5)に示すようにシステム破壊確率目標値に対する各断面のシステム破壊確率の分散最小案を、最低水準ベースのキャリブレーションについては式(6)に示すようにシステム破壊確率に関する現行設計法と信頼性設計法の5%超過確率の差の絶対値最小案を最適案として採用する。

ここに,

$$\sum (P_{ft} - P_{fr})^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

P_{ft} : システム破壊確率の目標値, P_{fr} : 信頼性設計法によるシステム破壊確率

ここに,

$$|P_{f5\%p} - P_{f5\%r}| \rightarrow \min \quad (6)$$

$P_{f5\%p}$: 現行設計法によるシステム破壊確率の5%超過確率
 $P_{f5\%r}$: 信頼性設計法によるシステム破壊確率の5%超過確率

解析結果を図-8に示す。水平軸は目標安全性指標であるが、左端の現行と記した部分は現行設計法による値であることを示す。鉛直軸にはシステム安全性指標の平均値及び5%非超過確率値、および現行設計法による堤体重量を1.0とした場合の信頼性設計法による堤体重量の平均値を示している。目標安全性指標を下げるに従って、システム安全性指標、堤体重量比も比例的に下がることが分かる。図-9に、各キャリブレーション条件の最適案の判定結果を示す。平均値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.45 のケースが、最低水準キャリブレーションについては目標安全性指標 2.20 のケースが適合する。前者の堤体重量比平均値は 0.99 とほぼ現行設計法と同じに保たれており、建設コストは変わらずに合理的な設計が行えることを示している。後者の堤体重量比平均値は 0.94 であり、現行設計法と比較して平均的に6%の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-10に示した。

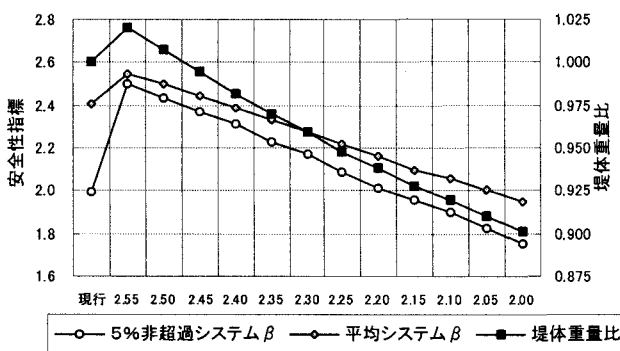
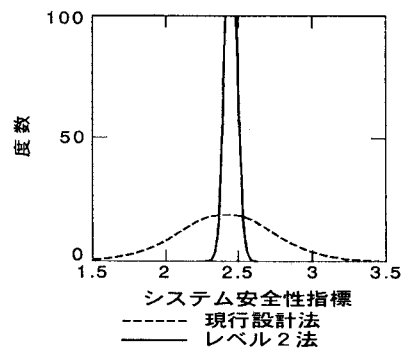


図-8 解析結果 (レベル2)



(a) 平均値設定

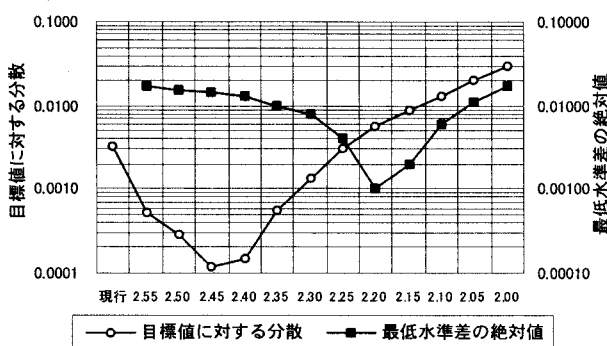
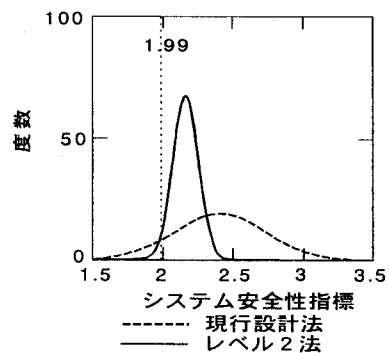


図-9 最適案の判定 (レベル2)



(b) 最低水準設定

図-10 キャリブレーション結果

(4) レベル1信頼性設計法によるキャリブレーション

レベル1信頼性設計法によって滑動・転倒・支持力の各破壊モードに対する安全性照査式を書き下すと、それぞれ式(7)~式(9)のようになる。

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (7)$$

$$a \sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - b P_{Bd} - c \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq d \gamma_{P_H} P_H \quad (8)$$

$$\frac{\sum \left\{ \left[\gamma_{c'} c'_k s + (\gamma_{w'_R} w'_k + \gamma_{q_R} q_k) \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k \right] \times \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k / F_f} \right\}}{\left\{ \sum (\gamma_{w'_S} w'_k + \gamma_{q_S} q_k) \sin \theta + e \gamma_{P_H} P_H / r \right\}} \geq F_f \quad (9)$$

ここに、記号 γ はその添え字に関する安全係数であり、添字 k および d はそれぞれ特性値および設計用値であることを表す。その他の記号については以下の通りである。

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合力(kN/m), P_H : 堤体に作用する水平波圧合力(kN/m), a : 堤体重量合力の作用線から堤体前趾までの距離(m), b : 浮力の作用線から堤体前趾までの距離(m), c : 揚圧力合力の作用線から堤体前趾までの距離(m), d : 水平波力の作用線から堤体底面までの距離(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(°), e : 水平波力のアーム長(m), r : すべり円弧の半径(m), F_f : 支持力に関する安全率

浮力設計用値 P_{Bd} はケーソンがフーチングを有しない場合、式(10)により得られる。

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{w\ell} w \ell_k + h) B \quad (10)$$

ここに、 ρ_w : 海水密度(t/m³), g : 重力加速度(m/s²), $w\ell$: 設計潮位(m), h : 堤体設置水深(m), B : 堤体幅(m)

支持力安全性照査については、上載荷重と分割細片の重量を考慮するが、これらは耐力と荷重の双方に影響し、かつ影響の度合いが異なるため、安全係数の値も異なることになる。また、堤体構成重量、揚圧力、浮力の安全係数は、滑動と転倒とでそれぞれの特値が性能関数に及ぼす影響が異なるため、これらの安全係数も異なった値となる。支持力安全性照査の安全率は確定的に扱い、現行設計法と同様に収束計算により求める。各モードに対する安全係数は、性能関数に式(2)~式(3)で述べた分離係数を導入することによって設定する。これらの値は安全性指標の算出の際に算出されるが、76の断面を対象にしているため、断面ごとに値にばらつきが生じる。このためここでは、性能関数を線形近似展開する際に生じる高次の項を無視することによって、例えば滑動については式(11)のように設定した。

$$\begin{aligned} \gamma_f &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_f) \mu_f / f_k \\ \gamma_{w_i} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{w_i}) \mu_{w_i} / W_{ik} \\ \gamma_{P_U} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{P_U}) \mu_{P_U} / P_{Uk} \\ \gamma_{w\ell} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{w\ell}) \mu_{w\ell} / w \ell_k \\ \gamma_{P_H} &= (1 + \alpha \beta_T V_{P_H}) \mu_{P_H} / P_{Hk} \end{aligned} \quad (11)$$

表-3 設計法の提案

レベル1

安全係数		平均値 設定	最低水準 設定	
滑動	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	1.08	
		混成堤・急	1.20	
		消波ブロック堤・緩	0.93	
		消波ブロック堤・急	1.04	
	摩擦係数 γ_f	0.87	0.88	
	揚圧力 γ_{PU}	混成堤・緩	0.92	0.91
		混成堤・急	1.02	1.00
		消波ブロック堤・緩 消波ブロック堤・急	0.82 0.90	0.81 0.89
	潮位 γ_{wl}	$\gamma_{wl} = 1.5$	1.17	1.15
		$\gamma_{wl} = 2.0 \sim 2.5$	1.34	1.31
自重 γ_{wi}	鉄筋コンクリート	0.96	0.96	
	無筋コンクリート 中詰砂	1.00 0.99	1.00 0.99	
転倒	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	1.08	
		混成堤・急	1.20	
		消波ブロック堤・緩	0.93	
		消波ブロック堤・急	1.04	
	揚圧力 γ_{PU}	混成堤・緩	0.99	0.97
		混成堤・急	1.09	1.07
		消波ブロック堤・緩 消波ブロック堤・急	0.87 0.96	0.85 0.95
	潮位 γ_{wl}	$\gamma_{wl} = 1.5$	1.24	1.22
		$\gamma_{wl} = 2.0 \sim 2.5$	1.48	1.44
	自重 γ_{wi}	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
無筋コンクリート 中詰砂		1.00 0.97	1.00 0.98	
支持力	水平波圧 γ_{PH}	混成堤・緩	0.99	
		混成堤・急	1.09	
		消波ブロック堤・緩	0.87	
		消波ブロック堤・急	0.96	
	上載荷重 γ_q	滑動側 抵抗側	0.81 0.72	0.81 0.72
	自重 $\gamma_{w'}$	滑動側 抵抗側	1.04 0.98	1.03 0.98
$\tan \phi'$ $\gamma_{\tan \phi'}$		0.92	0.92	
C' $\gamma_{c'}$	0.88	0.89		

*緩/急は海底勾配1/30未満/以上

レベル2

安全性指標	平均値 設定	最低水準 設定
目標安全性指標 β_T	滑動	2.45
	転倒	2.45
	支持力	2.45
		2.20

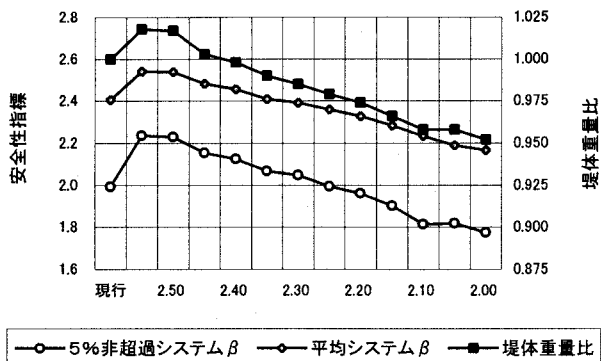


図-11 解析結果

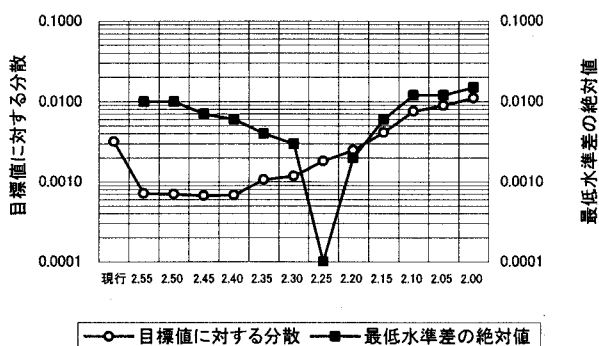
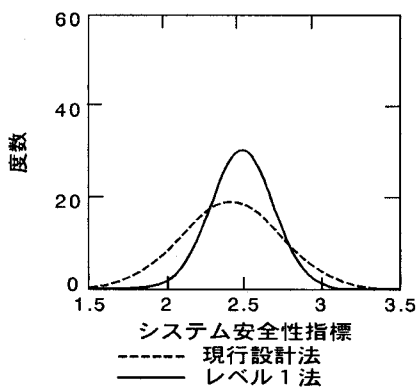
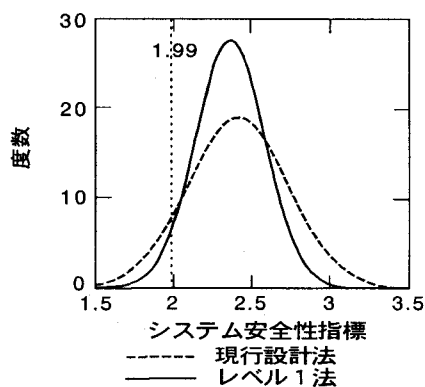


図-12 最適案判定



a) 平均値設定



b) 最低水準設定

図-13 キャリブレーション結果

分離係数 α , α' , α'' , α''' は、耐力と荷重効果の標準偏差の比の値が 1.0 に近い場合の近似値である 0.70 をすべての安全係数に採用した。レベル 2 信頼性設計法の場合と同様に、式(7)～式(9)を満足する最小の堤体幅を算出し、その堤体幅に対する各破壊モードの安全性指標を算出し、これをもとにシステム破壊確率を算出する。目標安全性指標 β_T についてもレベル 2 の検討と同様とした。解析結果を図-11 に示す。水平軸および鉛直軸は図-8 と同じである。レベル 2 の結果と比較すると、目標安全性指標の変化に対するシステム安全性指標および堤体重量比の変化の度合いが鈍いことが分かる。これは、複雑な性能関数を持つ破壊モードに対するレベル 1 の方法の破壊制御性能の限界を示しているものと考えられる。図-12 には、各キャリブレーション条件の最適案の判定結果を示す。平均値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.45 のケースが、下限値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.25 のケースが適合する。これはレベル 2 の方法の場合とほぼ同じ結果となった。平均値キャリブレーションの堤体重量比平均値は 1.00 であり、現行設計法と建設コストは変わらないが、目標値に対する分散には 1 オーダーの差があり、現行設計法よりも合理的な設計が行える。下限値キャリブレーションの堤体重量比平均値は 0.98 であり、現行設計法と比較すると 2 % 程度の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-13 に示した。これまでの結果をまとめて、表-3 にレベル 1 およびレベル 2 の信頼性設計法による設計手法の提案を示す。

4. 今後の課題

性能規定型・信頼性設計型の港湾基準策定のためのコードキャリブレーション実施にあたり解決すべき課題として以下があげられる。

①目標安全性の設定

信頼性設計法においては目標安全性水準をどのように定めるかが最重要課題である。その際の最も有力な方法は、防波堤の例で示したように、過去の設計法における平均的な安全性水準に一致させる方法である。しかしながら、これまでの防波堤およびケーソン式岸壁の被災事例から推定される破壊確率は、それぞれ 7×10^{-3} および 5×10^{-2} である^{4),6)}。3. 4 ではこの安全性水準を目標値としてキャリブレーションを行った事例を示したが、これらの値は目標安全性としてはたして妥当な水準といえるのであろうか？

実際のところ、現行設計法の各施設の安全性水準は、それぞれ別個に工学的判断により定められてきた。このため、現行設計法の平均水準が妥当なものといえるのか、例えばライフサイクルコスト⁷⁾などの観点から検討を実施する必要があると考えている。

②耐震設計における設計地震動

信頼性設計法の構築にあたっては、設計パラメータの従う確率分布の把握が何よりも重要である。耐震設計において最も重要なパラメータは設計震度であるが、現行設計法の震度については、ハザードレベル（年超過確率）が明確でない、ハザード（加速度期待値）から震度への換算に関する相関が明確ではないという非常に大きな問題がある。例えば、関東地区（A地区）の地域別震度は 0.15、液状化の検討をする際の基盤入力加速度最大値は 350Gal（SMAC 相当加速度：ハイカットフィルター処理後の加速度）であり、両者の相関が明確ではなく、設計震度の確率分布を検討する際のネックとなっている。また加速度最大値 350Gal は極値統計解析をもとにした 75 年期待値であるが、地震ハザード算出時に一般的に用いられる Gutenberg-Richter 式を用いた b 値モデルによる値と比較すると過大である可能性も考えられる。さらに、現在設計震度算出時に用いている重要度係数を破壊確率許容値にどのように反映するべきかという問題点もある。

このため、次期基準の設計地震動算出の際には、基盤入力地震動を一様ハザードスペクトルの形で提示し、設計においては 1 次元の地震応答計算を実施して設計震度を算出する方法の採用を検討している。その際、構造物の重要度の反映は、ハザードレベルを変更することで対応することが考えられる（図-14 参照）。

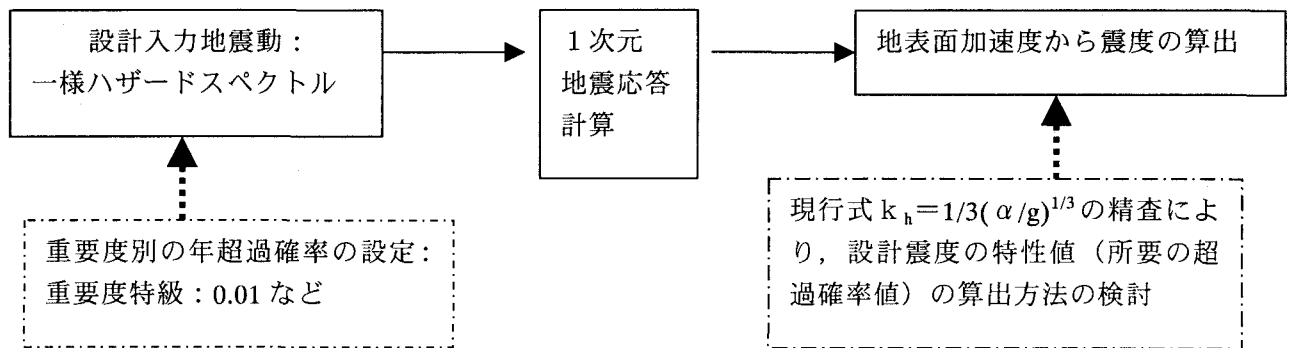


図-14 設計地震動に関する課題

③力か変形か：設計体系の構築

これまでの設計法は力の釣合いに基づく性能関数を評価することが多かった。しかしながら、構造物の荷重応答は非線形であることが多いため、力の釣合いではなく、変形に基づく方向に設計の規範をシフトすべきだという議論が一般的になりつつある。その場合には、信頼性設計法の導入にあっても変形が制御対象となり、変形の確率的評価を行う必要があが、一般的に変形の確率評価を行うことは困難である。さらに、変形を指標とした設計計算を標準化することは設計業務に対する負担を増加させることが予想される。そこで、設計計算は力を規範とした信頼性設計法とし、必要に応じて設計断面について変形などを確定的に照査するスタイルが妥当ではないかと考えている（変形照査で許容値をクリアできない時は断面変更を行うが、最適化は行わない）。その場合に、力に基づく設計と変形の照査が大局的には調和的な結果となるような体系を構築しておく必要があると考えられる。

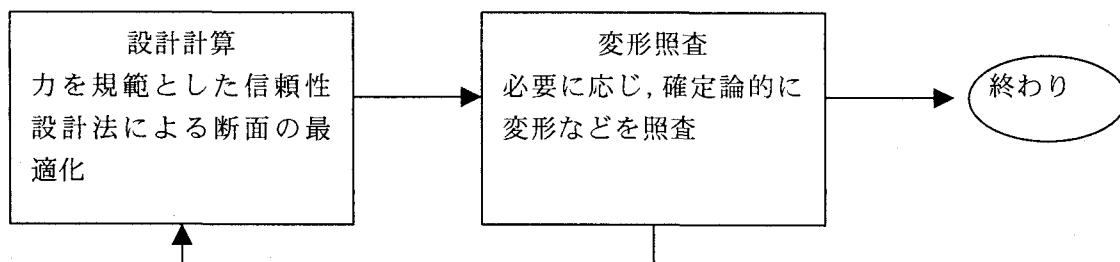


図-15 標準的な設計法の体系イメージ

5. おわりに

本稿では、港湾基準の性能規定型基準に向けた改訂動向をとりまとめたが、新設計法のイメージを図-16に示した。解決すべき課題は山積しているが、合理的な設計法構築に向けて進んでいきたい。各方面からのご意見をいただければ幸いである。

参考文献

- 1)運輸省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 2)星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 3)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.
- 4)長尾 毅，吉浪康行：信頼性解析によるケーソン式防波堤の外的安定性評価，構造工学論文集Vol.47A, pp.305-312, 2001.
- 5)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法の適用，土木学会論文集，No.689, I-57, pp.173-182, 2001.

6)長尾 毅, 吉浪康行, 佐貫哲朗, 嘉門雅史: ケーソン式岸壁の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.293-304, 2001.

7)長尾 毅: 破壊確率を考慮した防波堤の期待総費用最小化に関する研究, 第4回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2000)論文集, pp.441-448, 2000

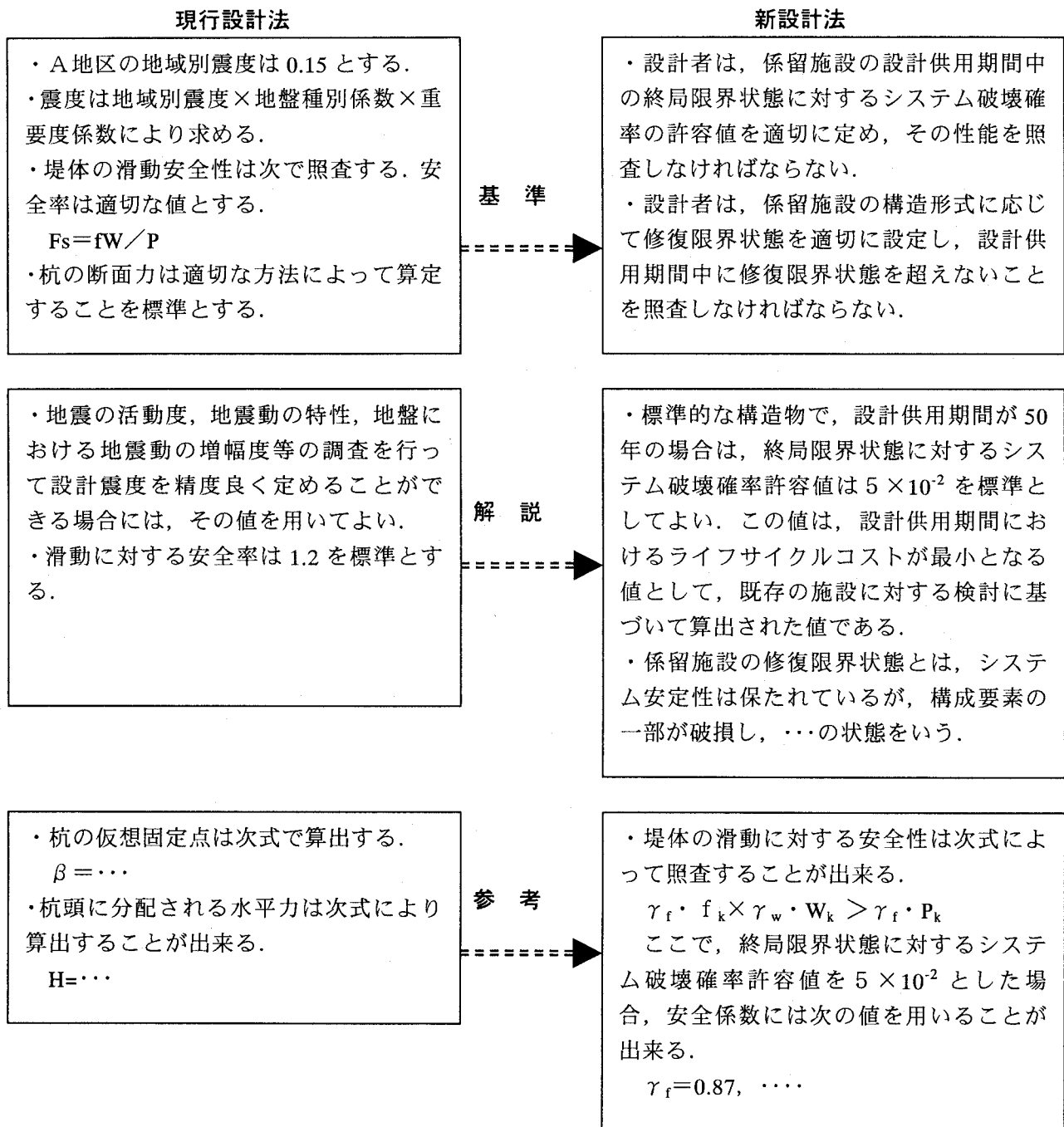


図-16 新設計法のイメージ