

# 港湾基準の国際化対応について

- 信頼性設計による性能規定型基準をめざして -

国土技術政策総合研究所 港湾研究部長 山本修司

## 1. はじめに

国際標準化機構 ISO の TC98 では、国際規格としての「構造物の設計の基本」が議論されている。一方、欧州においては欧州標準化委員会 CEN が EU 内の統一規格として Eurocodes を策定している。そこでは、我々が 100 年以上にわたって使用してきた安全率を用いる設計法や許容応力度設計法に代わって、信頼性設計をベースとした性能規定型基準が主流となりつつある。そのため、港湾の技術基準についても ISO 等の国際規格との整合性を図る必要があると考えている。

本稿では、構造物の設計法に関する国際的動向、港湾基準の国際整合の必要性、港湾分野における ISO 等への対応状況、港湾基準の改正の方向、防波堤の設計に関するコードキャリブレーションについて紹介する。なお、港湾基準改正の基本的考え方については、今後各方面における議論により内容に変更がありえる。

## 2. 構造物の設計に関する国際的動向<sup>1)</sup>

WTO/TBT 協定の発効に伴い、ISO (International Organization for Standardization) で策定される国際規格は、国内規格の基礎として採用することが求められている。また、ISO は Eurocodes を策定している CEN (European Committee for Standardization) と極めて密接な関係にある。1991 年に ISO と CEN との間で結ばれたウィーン協定によれば、CEN で先行的に規格策定作業が行われる規格について、ISO は規格策定作業を行わず、CEN での作業結果が ISO の規格原案となる。地域規格である欧州規格 EN (European Normalization) がそのまま国際規格となる道が用意されている。

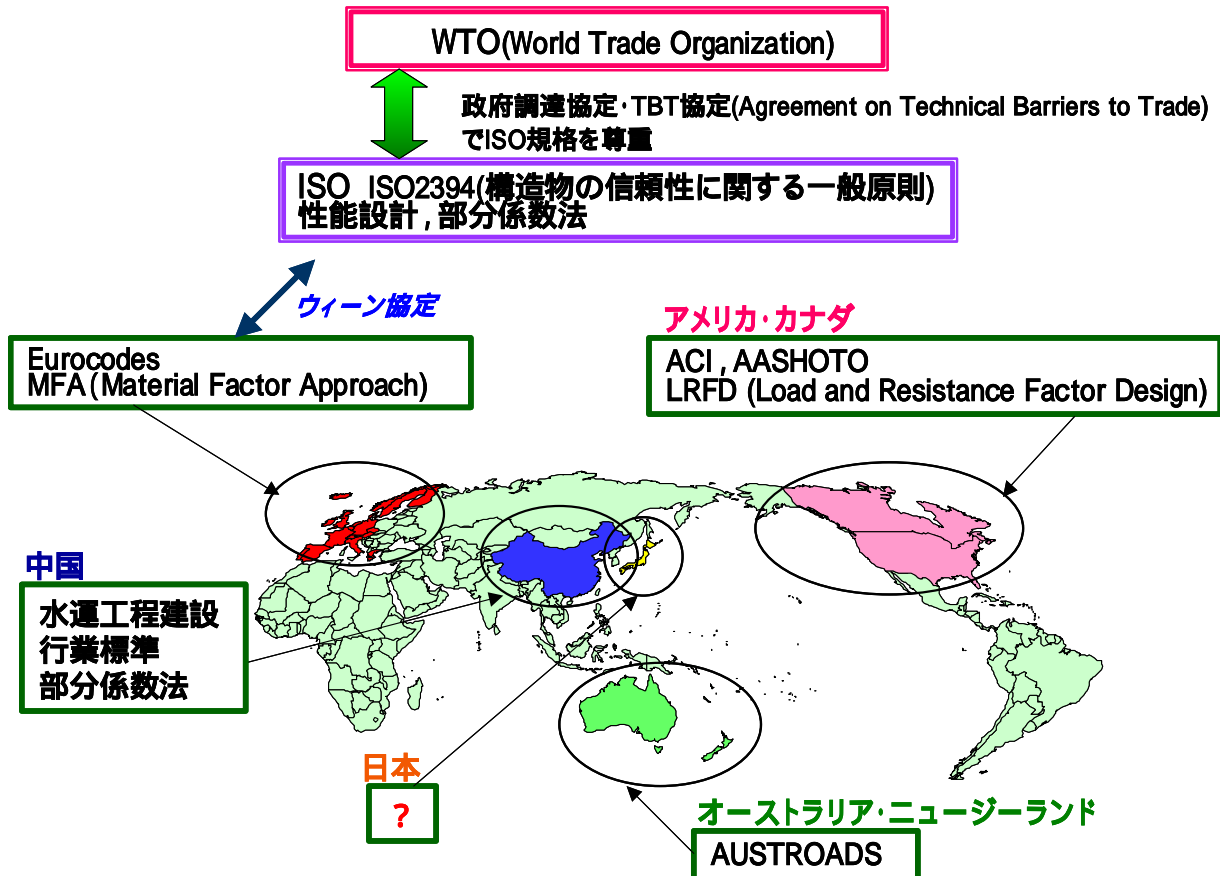


図 - 1 設計法を巡る国際的動向

表-1 TBT 協定第 2 条(抜粋)

2.4 Where technical regulations are required and relevant international standards exist or their completion is imminent, Members shall use them, or the relevant parts of them, as a basis for their technical regulation....

2.8 Wherever appropriate, Members shall specify technical regulations based on product requirements in terms of performance rather than design or descriptive characteristics.

表-2 ISO2349 基本的要求事項(抜粋)

Structures and structural elements shall be designed, constructed and maintained in such a way that they are suited for their use during the design working life and in an economic way. In particular they shall, with appropriate degrees of reliability, fulfill the following requirements:

- they shall perform adequately under all expected actions (serviceability limit state requirement);
- they shall withstand extreme and/or frequently repeated actions occurring during their construction and anticipated use (ultimate limit state requirement);

ISO/TC98 が作成した ISO2394 General principles on reliability for structures ( 構造物の信頼性に関する一般原則 ) は、各種の作用(荷重)の考え方や構造物の信頼性評価に関する一般原則を記述している。構造物とその各部は、構造物の設計供用期間を通して、使用限界状態と終局限界状態に対して要求される性能を有する必要がある。その信頼性は、部分係数法あるいはより直接的な指標である安全性指標や破壊確率により評価される。ISO2394 は設計の原則や基本的事項をとりまとめたものであり、実際の設計作業を行うためには、もっと具体的な記述が必要となる。そのため、TC/98/SC2/WG8 (幹事国；オーストラリア) が General framework for structural design ( 構造設計の一般的枠組み ) の策定作業を開始している。その内容には十分に関心を払う必要がある。

一方、CEN は構造物の設計の基本を記述した EN1990 Basis of Structural Design や EN1991 Action on structures を策定しているが、その内容は概ね ISO2394 と同じである。

### 3 . 港湾の施設の技術上の基準の国際整合性<sup>2), 3), 4), 5)</sup>

港湾の施設の技術上の基準(以下、港湾基準)を信頼性設計をベースにした性能規定型基準に変更するとともに、ISO 等の国際規格との整合を図ることの必要性を例示すると以下のとおりである。

#### 3.1 国内建設プロジェクトにおける貿易摩擦の回避

- ・ WTO/TBT 協定の遵守

#### 3.2 建設に関する国際市場の確保競争

- ・ 欧州...国際規格化を手段として市場を獲得(Eurocodes の ISO 規格化)
- ・ 東南アジア...ISO 規格を自国の規格へ導入する動き
- ・ 中国...WTO 加盟を機に国際規格の導入(交通部は、Laws of International Standardization of the People's Republic of China に基づいて、2000年6月に Technical codes for port engineering を完成。設計法として部分係数法を採用)
- ・ 日本...国内市場から国外市場へ

#### 3.3 関連技術や資材等の国際的調和と流動性の向上

- ・PIANC における防舷材の性能試験法と設計法
- ・外国製品の利用によるコスト縮減

### 3.4 技術の進歩が生かされる技術基準体系

- ・地盤調査方法や土質試験法等の精密化と地盤設計
- ・波浪観測や波浪推算法等の精密化と防波堤の設計
- ・新形式の構造物を採用することによるコスト縮減

## 4 . 港湾分野における ISO 等への対応状況

### 4.1 ISO/SC3/WG8 Actions from waves and currents (波・流れの作用)

波・流れの作用は防波堤や護岸の設計において最も基本的事項である。また、この分野の日本の研究成果は、BS6349 Maritime Structures 等に採用されるなど国際的にも高く評価されている。従って、この WG については、重大な関心を寄せるとともに十分に国際貢献できるものと考えている。日本からは、合田良実 横浜国立大学名誉教授が WG メンバーとして参加している。今年 12 月、第 3 回会議において WG ドラフトの全体骨子が議論された。

波の不規則波浪としての取り扱い、極値波浪統計解析、港湾・海岸構造物の性能設計等が議論されている。参考 1 に WG ドラフトの目次案を紹介する。

### 4.2 ISO/SC3/WG10 Seismic actions on geotechnical works (地盤基礎構造物への地震作用)

既に規格化されている ISO3010 Bases for design on structures - Seismic actions on structures - (構造物の設計の基本 - 構造物への地震作用)は、その適用が建築物や類似の構造物に限られており、地盤と構造物との地震時相互作用に大きく影響される岸壁やトンネル等の構造物を対象としたものではない。このため、井合進 京都大学教授が主査となって標記の WG が発足した。参考 2 に WG ドラフトの目次案を紹介する。この他、ISO/TC71/SC4 で担当していた Performance and assessment requirements for structural concrete や ISO/TC156/WG10 の Cathodic protection of buried and immersed metallic structures 等、港湾に関係の深い内容については、国内審議団体を通じて意見・修正案等を提出してきた。

## 5 . 現在の港湾構造物の設計の考え方

### 5.1 港湾基準の体系

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 地震動に対する変形照査の考えの導入、および直杭式栈橋の保有水平耐力法による耐震性能照査などは盛り込まれた。

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」<sup>6)</sup>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、及びその参考である。このうち、強制力があるものは港湾基準のみであり、解説及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。

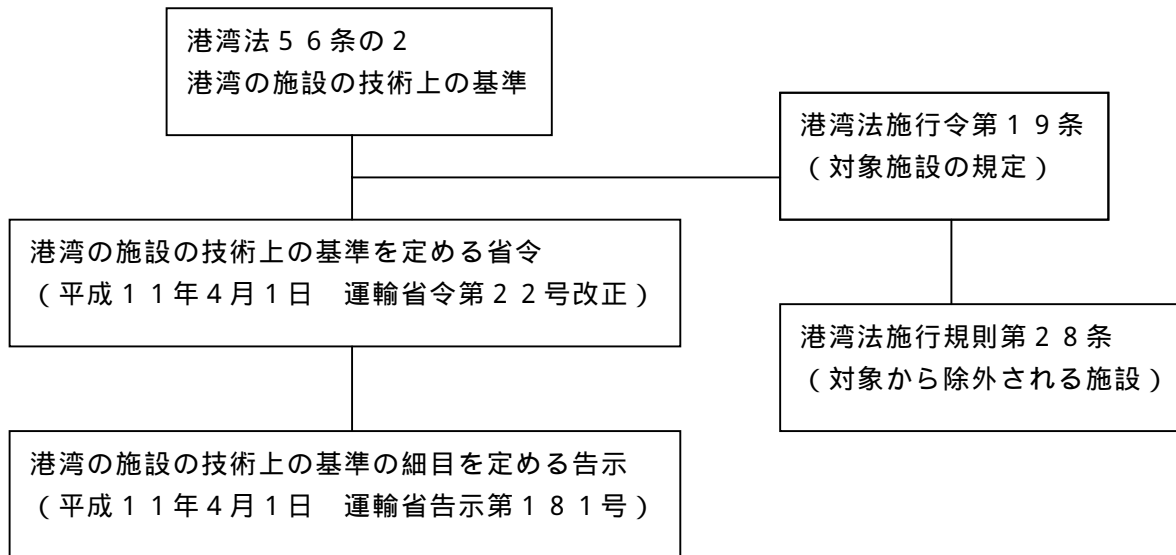


図-2 港湾の施設の技術上の基準の法令上の体系

## 5.2 港湾構造物の現行設計法

港湾構造物は、一部を除いて許容応力度設計法あるいは安全率を用いた設計法で設計されている。この設計法は、以下のような特徴を有する。

- (1)許容応力度設計法とは、「材料の公称基準強度（応力度）を適当な安全率で除した値を許容応力度とし、設計荷重による計算応力度が、この許容応力度を超えないことを照査する設計方法」である。
- (2)許容応力度設計法の問題点

許容応力度設計法または安全率を用いた設計法は、伝統に裏打ちされ、莫大な実績をもつ極めて優れた方法であるが、以下のような不満足な点もある。

安全率や許容応力度自身が、構造物の信頼性の絶対的尺度になっていない。すなわち、構造物の設計を行うときの不確実性をカバーする安全率の値が試行錯誤の結果、経験的に決められている。したがって、この方法では、例えば、抗の鉛直支持力の安全率が3であり、斜面の円形すべりの安全率が1.5であるからといって、前者が後者より2倍安全であるとはいえない。防波堤の滑動に対する安全率は、波力作用と滑動抵抗力の両方の不確実性を考慮して1.2としている。従って、波力公式が精密になったから安全率を下げようとしても、安全率をいくらにすればよいか検討がつかない。

## 6. 港湾基準改訂に向けた取り組み

### 6.1 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 $2 \times 10^{-2}$ 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。

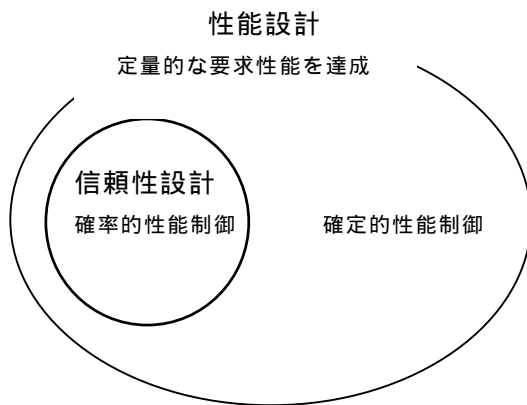


図-3 性能設計と信頼性設計

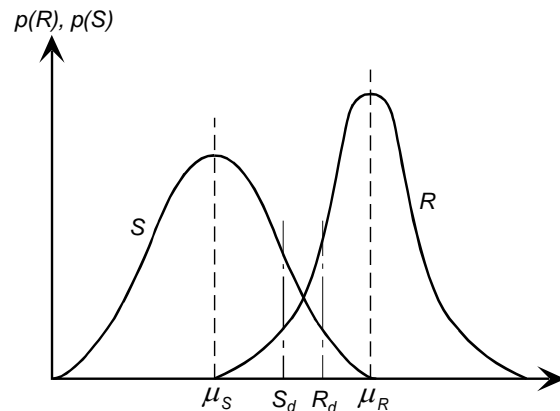


図-4 信頼性設計

## 6.2 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、 $R_d$  及び  $S_d$  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<sup>7)</sup>(表-3)。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-3 信頼性設計法の3つのレベル<sup>12)</sup>

レベル	安全性照査式	基準パラメータ
レベル3	$p_f, p_{fa}$	破壊確率
レベル2	$T$	安全性指標
レベル1	$R_d, S_d$	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、 $\gamma_R$  : 耐力に関する安全係数、 $\gamma_S$  : 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  $\alpha_R, \alpha_S$  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、 $\mu$  及び  $\sigma$  は、その添字の変数に関するそれぞれ平均値及び標準偏差であり、 $\gamma_T$  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。

$$\tau \quad (4)$$

### 6.3 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と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。

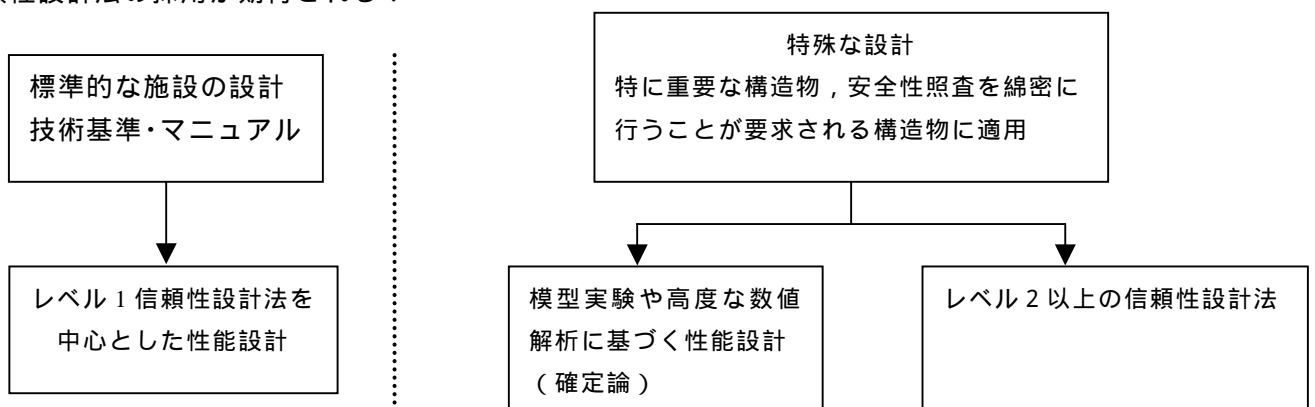


図-5 設計法の将来展望

## 6.4 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<sup>9),10),11)</sup>

### (1) 概要

レベル1及びレベル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及びレベル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-4のように推定した。基本的に各設計変数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<sup>8)</sup>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、安全率から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。

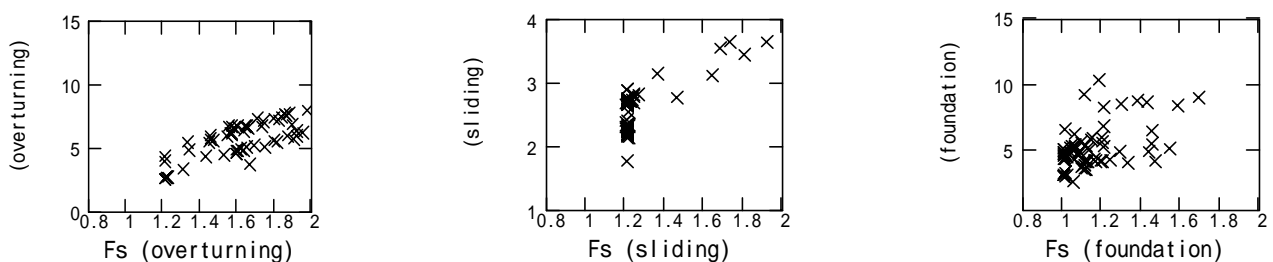


図-6 安全性指標と安全率の関係

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( $2.30 \times 10^{-2}$ )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。

表-4 設計因子の従う確率分布

		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
碎波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケソ式混成堤	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) : 平均値の偏り (平均値 / 設計用値)

V: 変動係数

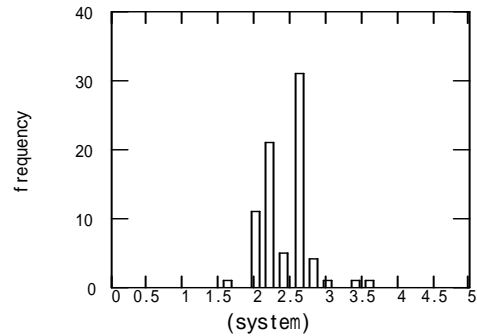


図-7 システム安全性指標の分布

(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。

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

ここに、

$P_{ft}$  : 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

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

ここに、

$P_{f5\%p}$  : 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、建設コストは変え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。

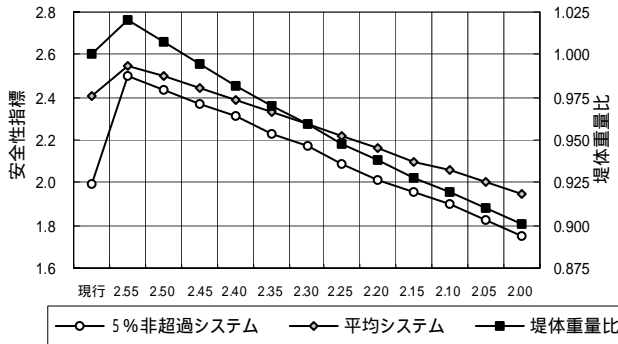


図-8 解析結果 (レベル 2)

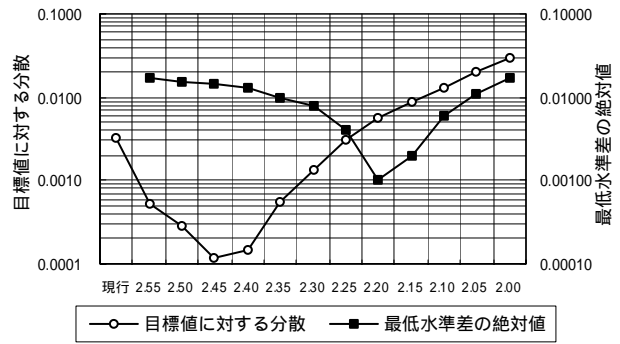
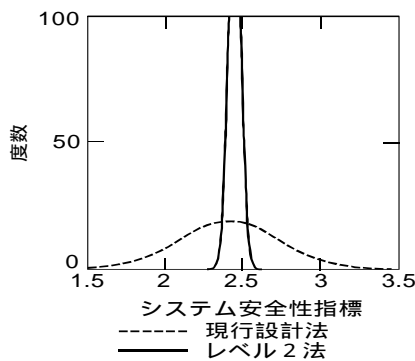
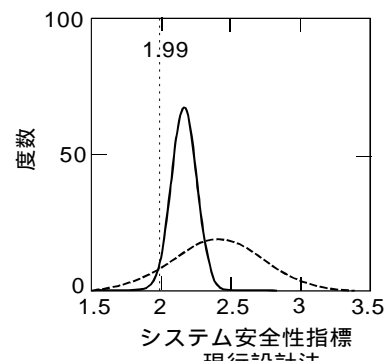


図-9 最適案の判定 (レベル 2)



(a)平均値設定



(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。

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

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

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

ここに、記号  $\gamma$  はその添え字に関する安全係数であり、添字  $k$  及び  $d$  はそれぞれ特性値及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/m<sup>2</sup>),  $s$ : 分割細片の幅(m),  $\alpha'$ : 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),  $\theta$ : 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。

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

ここに、 $\rho_w$ : 海水密度(t/m<sup>3</sup>),  $g$ : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>),  $w\lambda$ : 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長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。

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

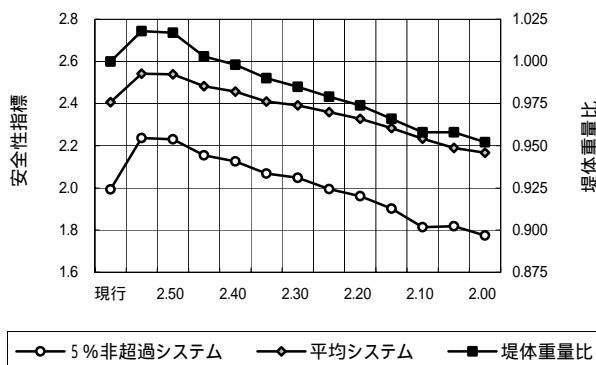


図-11 解析結果(レベル1)

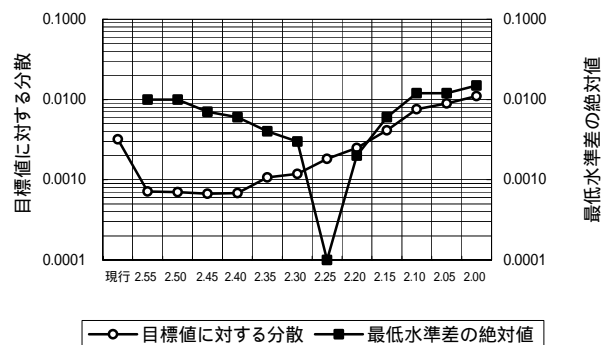
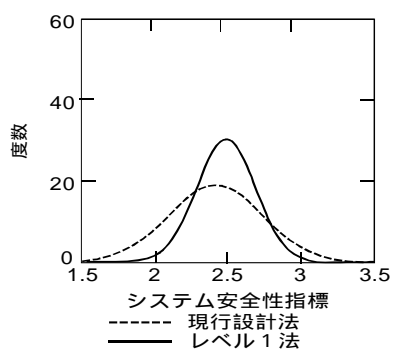


図-12 最適案判定(レベル1)

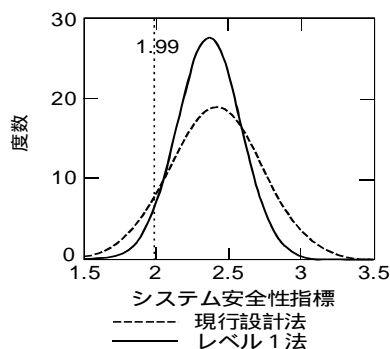
表-5 設計法の提案  
レベル1

安全係数		平均値 設定	最低水準 設定	
滑動	水平波圧 $PH$	混成堤・緩	1.08	1.05
		混成堤・急	1.20	1.17
		消波ブロック堤・緩	0.93	0.91
		消波ブロック堤・急	1.04	1.02
	摩擦係数 $f$		0.87	0.88
	揚圧力 $PU$	混成堤・緩	0.92	0.91
		混成堤・急	1.02	1.00
		消波ブロック堤・緩	0.82	0.81
		消波ブロック堤・急	0.90	0.89
	潮位 $w/l$	$w/l = 1.5$	1.17	1.15
$w/l = 2.0 \sim 2.5$		1.34	1.31	
自重 $w_i$	鉄筋コンクリート	0.96	0.96	
	無筋コンクリート	1.00	1.00	
	中詰砂	0.99	0.99	
転倒	水平波圧 $PH$	混成堤・緩	1.08	1.05
		混成堤・急	1.20	1.17
		消波ブロック堤・緩	0.93	0.91
		消波ブロック堤・急	1.04	1.02
	揚圧力 $PU$	混成堤・緩	0.99	0.97
		混成堤・急	1.09	1.07
		消波ブロック堤・緩	0.87	0.85
		消波ブロック堤・急	0.96	0.95
	潮位 $w/l$	$w/l = 1.5$	1.24	1.22
		$w/l = 2.0 \sim 2.5$	1.48	1.44
自重 $w_i$	鉄筋コンクリート	0.96	0.96	
	無筋コンクリート	1.00	1.00	
	中詰砂	0.97	0.98	
支持力	水平波圧 $PH$	混成堤・緩	0.99	0.97
		混成堤・急	1.09	1.07
		消波ブロック堤・緩	0.87	0.85
		消波ブロック堤・急	0.96	0.95
	上載荷重 $q$	滑動側	0.81	0.81
		抵抗側	0.72	0.72
自重 $w'$	滑動側	1.04	1.03	
	抵抗側	0.98	0.98	
$\tan \phi$		0.92	0.92	
$C'$		0.88	0.89	

\*緩 / 急は海底勾配1/30未満 / 以上



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

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 $T$	滑動	2.45	2.20
	転倒	2.45	2.20
	支持力	2.45	2.20

分離係数  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$ ,  $\gamma'''$  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  $T$  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及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-5にレベル1及びレベル2の信頼性設計法による設計手法の提案を示す．

## 7. 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．

### 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，これまでの防波堤及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 $7 \times 10^{-3}$ 及び $5 \times 10^{-2}$ である<sup>9),11)</sup>．6.4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<sup>12)</sup>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．

### 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たって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るが，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．

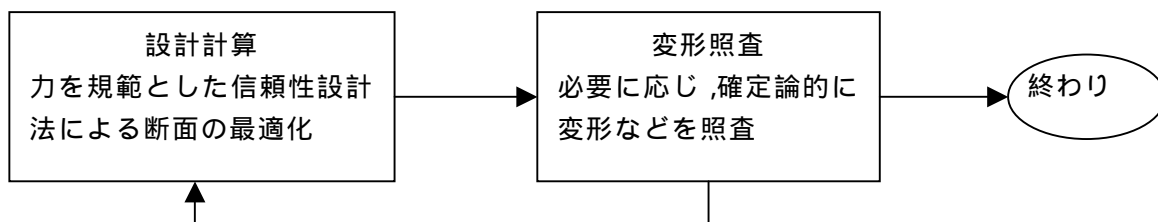


図-14 標準的な設計法の体系イメージ

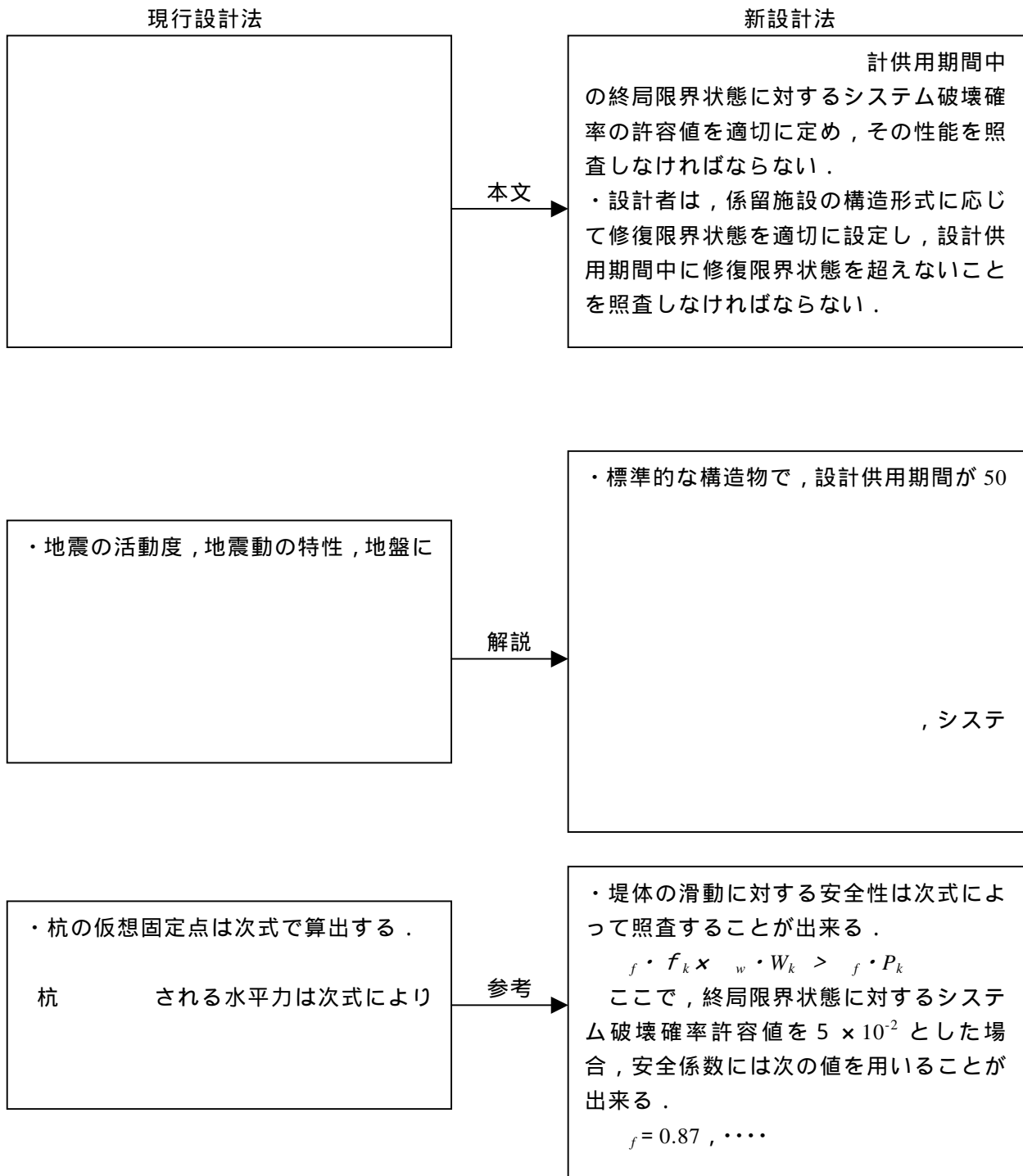


図 - 15 新設計法のイメージ

8. 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、新設計法のイメージを図-15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。なお、本稿は、長尾港湾施設研究室長が鋼構造と橋に関するシンポジウム（2002.8）で発表した論文に加筆修正したものである。また、合田良実横浜国立大学名誉教授及び井合進京都大学教授から、ISO/TC98/WG8 及び WG10 の作業状況について情報を提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1)山本修司：港湾構造物の設計における国際規格の適用とその課題，港湾技術研究所講演会講演集，pp. 119 - 130，1999.
- 2)山本修司，森屋陽一：港湾分野における運輸省の取り組み，「ISO への対応」に関する第3回シンポジウム - ISO 規格と認証制度 - 講演資料集，pp. 31 - 43，土木学会，2000.
- 3)山本修司：港湾の技術基準の国際化対応について，港湾空港技術特別講演会 in 仙台，講演集，pp. 53 - 68，2001.
- 4)山本修司：アジア各国の技術基準事情，土木 ISO ジャーナル，Vol. 8，2002.
- 5)山本修司，菊池喜昭：港湾構造物の性能規定型設計コードについて，基礎工 Vol. 29，No. 8，pp. 25 - 29，2001.
- 6)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.
- 7)星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 8)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.
- 9)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.
- 10)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，-57，pp.173-182，2001.
- 11)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.
- 12)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.

## 参考 1 ISO/SC3/WG8 Actions from waves and currents

### 1 Scope

### 2 Normative reference

### 3 Terms and definitions

### 4 Symbols

### 5 Design parameters

#### 5.0 Examination of uncertainties related to wave and current action

#### 5.1 Water levels

##### 5.1.1 Tides

##### 5.1.2 Storm surges

##### 5.1.3 Joint probabilities of waves and high water level

#### 5.2 Waves

##### 5.2.1 Wave heights and periods

##### 5.2.2 Wave spectra

##### 5.2.3 Extreme wave statistics

##### 5.2.4 Wave transformation

###### 5.2.4.1 Wave shoaling

###### 5.2.4.2 Wave refraction

###### 5.2.4.3 Wave diffraction

###### 5.2.4.4 Wave breaking

###### 5.2.4.5 Wave reflection

###### 5.2.4.6 Other transformations

##### 5.2.4.7 Wave crest elevation and wave kinematics

## **5.3 Currents**

### **5.3.1 Current parameters**

### **5.3.2 Interaction between currents and waves**

## **6 Wave and current action on fixed structures**

### **6.1 Armour units on mound breakwaters**

### **6.2 Wave action on vertical and composite structures**

### **6.3 Wave actions on coastal dikes and seawalls**

### **6.4 Wave and current actions on cylindrical members and isolated structures**

### **6.5 Wave and current actions on piers**

### **6.6 Wave action on other structures**

## **7 Wave interaction with floating structures in shallow water**

### **7.1 Floating breakwaters**

### **7.2 Ships at moorings**

#### **7.2.1 Berthing operation**

#### **7.2.2 Ship loads onto mooring**

#### **7.2.3 Interactions between multiple floating bodies**

### **7.3 Buoys**

### **7.4 Wave power devices**

## **8 Scour at structures by action from waves and currents**

### **8.1 Local scour**

#### **8.1.1 Piles: single and multiple**

#### **8.1.2 Square or circular bodies**

#### **8.1.3 Walls and long bodies caisson**

#### **8.1.4 Rubble mound structures**

### **8.2 Scour protection with toe protection**

### **8.3 Down-drift erosion and general bed movements**

## **9 Performance-based design of maritime structures**

### **9.1 General approach**

### **9.2 Mound breakwaters**

#### **9.2.1 Conventional rubble mound breakwaters**

#### **9.2.2 Berm breakwaters**

### **9.3 Caisson breakwaters**

### **9.4 Coastal dikes**

### **9.5 Other structures**

## **Annex A**

## **Annex B**

## **Bibliography**

## **参考 2 ISO/SC3/WG10 Seismic actions on geotechnical works**

### **Foreword**

### **Introduction**

### **1 Scope**

### **2 Normative references**

### **3 Terms and definitions**

### **4 Symbols and abbreviated terms**

### **5 Principles and abbreviated terms**

#### **5.1 Principles**

## **5.2 Procedure**

# **6 Evaluation of earthquake motions, liquefaction potential, and fault displacement**

## **6.1 Objective**

## **6.2 Seismic hazard analysis**

## **6.3 Site response/liquefaction analysis**

### **6.3.1 General**

### **6.3.2 Empirical analysis**

### **6.3.3 Site specific pseudo-static analysis**

### **6.3.4 Site specific dynamic simplified analysis**

### **6.3.5 Site specific dynamic detailed analysis**

## **6.4 Spatial variation**

### **6.4.1 General**

### **6.4.2 Simplified analysis**

### **6.4.3 Site specific simplified analysis**

### **6.4.4 Site specific dynamic analysis**

## **6.5 Seismic fault displacement**

# **7 Procedure for evaluating seismic actions**

## **7.1 Analysis type and model**

## **7.2 Seismic actions for pseudo-static analysis**

### **7.2.1 Simplified analysis**

### **7.2.2 Detailed analysis**

## **7.3 Seismic action for dynamic analysis**

### **7.3.1 Simplified analysis**

### **7.3.2 Detailed analysis**

# **8 Seismic actions for pseudo-static analysis**

## **8.1 Seismic actions for simplified analysis**

### **8.1.1 Seismic actions from a superstructure**

### **8.1.2 Seismic actions of ground without spatial variation**

### **8.1.3 Seismic actions of ground with spatial variation**

### **8.1.4 Earth and fluid pressures**

### **8.1.5 Seismic actions on soil mass**

### **8.1.6 Effects of soil liquefaction and ground failure**

### **8.1.7 Effects of fault displacement**

## **8.2 Seismic actions for detailed analysis**

### **8.2.1 Detailed pseudo-static analysis**

### **8.2.2 Seismic actions for a seismic deformation model**

### **8.2.3 Seismic actions for a seismic coefficient model**

### **8.2.4 Effects of liquefaction and ground failure**

# **9 Seismic actions for dynamic analysis**

## **9.1 Seismic actions for simplified analysis**

### **9.1.1 Seismic actions from a superstructure**

### **9.1.2 Seismic actions of ground without spatial variation**

### **9.1.3 Seismic actions of ground with spatial variation**

### **9.1.4 Seismic actions on sliding block model**

## **9.2 Seismic actions for detailed analysis**

### **9.2.1 Seismic actions for a soil-structure system**

### **9.2.2 Effects of soil liquefaction and ground failure**