

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

長尾 毅

正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

本研究は、ケーソン式防波堤の外的安定照査にレベル1およびレベル2の信頼性設計法を適用する手法を提案するものである。波力、自重、基礎地盤強度などの設計パラメータの従う確率分布を用いて、全国の防波堤の建設事例をもとに、信頼性理論により現行設計法による施設の総合的な安全性水準を明らかにした。次に、信頼性設計法による目標安全性の設定を行い、信頼性設計法によるコードキャリブレーションを行った。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行った。

Key Words: reliability based design, safety index, code calibration, breakwater

1. はじめに

港湾構造物の設計においては、長年にわたり安全率を用いた確定論的設計法が適用されてきた。この方法は簡易であるものの、構造物の破壊可能性を定量的にコントロールするものではない。次世代の標準的な設計法として信頼性設計法が注目を浴びて久しいが、ISO2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) において明確に位置づけられるなど、港湾構造物の設計に信頼性設計法を導入する気運が高まってきた。信頼性設計法には、破壊可能性の制御方法に関して3つのレベルの方法がある。

防波堤の外的安定に信頼性設計法の適用を試みた例としては高山ら¹⁾の検討があげられる。厳密な確率演算によるレベル3の信頼性設計法を対象としているが、支持力破壊は扱っていない。レベル3の方法は、設計者の判断により採用することは差し支えがないものの、汎用的な設計実務 (技術基準類) への導入としては、数値計算の複雑さなどの観点から必ずしも実用的ではないと筆者は判断している。このため、筆者らは、Cornellタイプ²⁾の安全性指標を用いて防波堤の外的安定問題に信頼性設計を適用するためのアプローチを行うとともに³⁾、より精度よく破壊可能性を評価することが可能なHasofer-Lindタイプ⁴⁾の安全性指標を用いて滑動および支持力に関する防波堤の安全性水準を推定し、被災事例より算出される安全性指標との比較検討を行った⁵⁾。

本研究は、各種の安全係数を用いるレベル1の信頼性

設計法および安全性指標を判定基準とするレベル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提案するものである。このため、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. 設計因子の従う確率分布

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-1のように推定した^{1) 5)}。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。水深変化の緩急については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、碎波変形推定精度、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。潮位については、図-1に示したように、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_w の地域

表-1 設計因子の従う確率分布⁹⁾

	α	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
潮位 (w_l)		
$r_w=1.5$	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_i, 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) α : 平均値の偏り (平均値/設計用値)

V : 変動係数

区分⁹⁾に従い分類したもので、被災事例をもとに設定した分布である。摩擦係数、単位体積重量および基礎地盤強度については、各種試験結果をもとに設定している。なお通常、防波堤は耐用年数を50年とし、耐用年数に等しい50年の再現期間の波高を有する波を設計波とする。本研究では設計波作用時の条件付き安全性指標および破壊確率を取り扱い、波力に関する確率分布などは設計波に関する分布を示している。

3. 現行設計法による施設の安全性水準

本研究で扱う防波堤の3つの破壊モード、滑動、転倒、支持力破壊に関する安全性照査式を書き下すと、それぞれ式(1)~式(3)のようになる⁹⁾。波力 P_H 及び揚圧力 P_U は港湾の施設の技術上の基準⁹⁾に従って算出する。式(1)~式(3)に示したパラメータのうち本研究において確率変数として扱うものは、摩擦係数 f 、堤体構成材料重量 W_i 、浮力 P_B 、揚圧力合力 P_U 、水平波圧合力 P_H 、粘着力 c' 、せん断抵抗角 ϕ' 、分割細片重量 w' 、上載荷重 q である。

$$F_s \leq \frac{f(\sum_i W_i - P_B - P_U)}{P_H} \quad (1)$$

$$F_t \leq \frac{a \sum_i W_i - b P_B - c P_U}{d P_H} \quad (2)$$

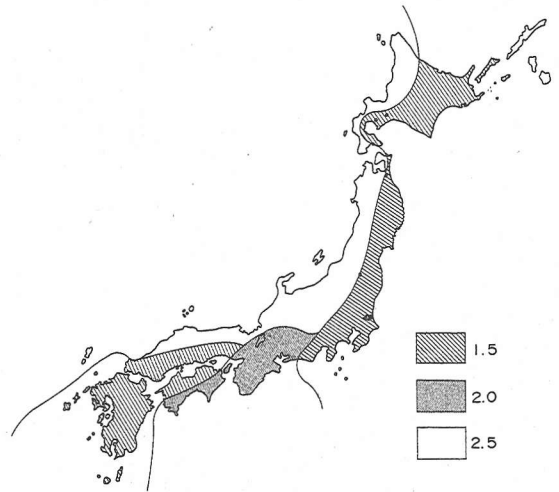
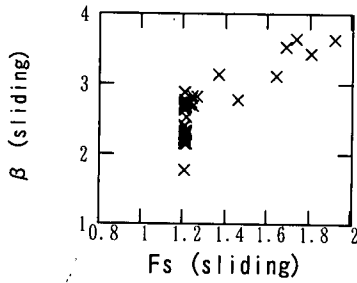


図-1 既往最高潮位とさく望平均満潮位の比 r_w の地域区分⁹⁾

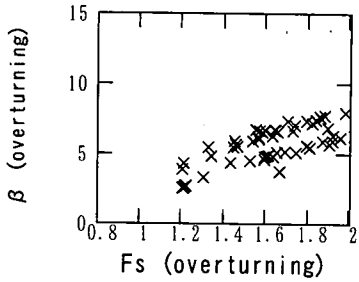
$$F_f \leq \frac{\sum \left\{ [c's + (w'+q) \tan \phi'] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi' / F_f} \right\}}{\sum (w'+q) \sin \theta + e P_H / r} \quad (3)$$

ここに、

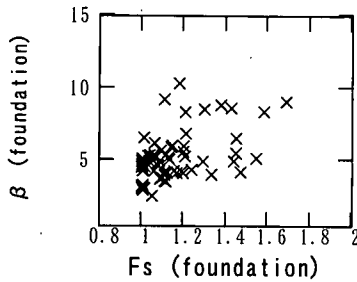
- f : 堤体底面と基礎との摩擦係数
- W_i : 堤体を構成する材料 (鉄筋コンクリート、無筋コンクリート、中詰砂) の重量 (kN/m)
- P_B : 堤体に作用する浮力 (kN/m)
- P_U : 堤体に作用する揚圧力合力 (kN/m)
- P_H : 堤体に作用する水平波圧合力 (kN/m)
- a : 堤体重量合力の作用線から堤体前趾までの距離 (m)
- b : 浮力の作用線から堤体前趾までの距離 (m)
- c : 揚圧力合力の作用線から堤体前趾までの距離 (m)
- d : 水平波力の作用線から堤体底面までの距離 (m)
- c' : 有効応力に基づく見かけの粘着力 (kN/m²)
- 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_s, F_t, F_f : それぞれ滑動、転倒、支持力に関する安全率で、波力作用時の滑動および転倒に対して1.2以上、支持力に対して1.0以上



(a) 滑動安全率に対する滑動安全性指標



(b) 転倒安全率に対する転倒安全性指標



(c) 支持力安全率に対する支持力安全性指標

図-2 安全率と安全性指標の関係

式より明らかのように、滑動については水平方向の力の釣り合いを、転倒については壁体前趾回りのモーメントの釣り合いを検証する。支持力に関しては、2層系地盤の偏心傾斜荷重作用時の支持力安全性としてビショップ法により安全性を確認する。ビショップ法の特徴として、安全率 F_s については収束計算により求められる。

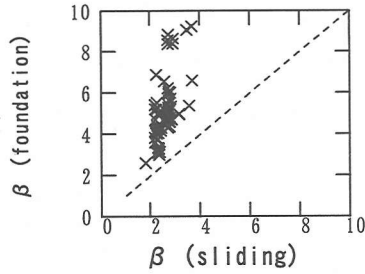
現行設計法による防波堤の外的安定水準を評価するため、近年の全国における防波堤の設計事例76例を収集した。事例収集にあたっては、地域的及び設計条件的に偏りのないように広範囲から条件を収集し、収集した施設の諸元が堀川ら⁷⁾による全国の防波堤の諸元の分布の傾向と基本的に一致することを確認した。構造形式別には、

ケーソン式混成堤は37ケース、消波ブロック被覆堤は39ケースとほぼ同数収集した。なお、収集した事例には安全率に余裕がある事例が含まれていたため、後述する信頼性設計法との合理性の比較を行う際の条件を揃える観点から、堤体幅を5cmピッチで変化させて、すべての破壊モードの許容安全率を満足する最小の堤体幅に補正を行った。ただし、設計波高が非常に大きいかまたは非常に小さい場合、ある破壊モードが卓越する場合があります、その結果卓越しないモードの安全率は許容値よりもかなり大きく、1.8程度にまでなるケースが存在する。

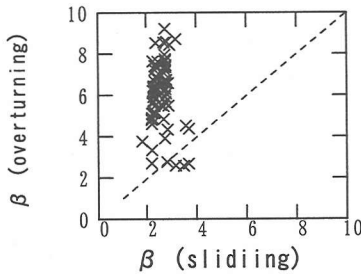
式(1)～式(3)をもとに性能関数を定義し、FORM (First-Order Reliability Method) に従いHasofer-Lindタイプ⁴⁾の安全性指標を算出する。潮位については、波力に及ぼす影響は少ないことから浮力への影響を考慮する。支持力に関しては、複数のすべり円弧により算出される最小の安全性指標を用いることとし、上載荷重は、鉛直・水平の各々の荷重平均値より得られる載荷幅をもとに設定する。また、地盤強度の自己相関性については、土田・湯⁸⁾と同様に、深度方向に2～2.5m程度を単位として確率的に独立な土層が堆積していると考え、水平方向については、海成粘土の物性について調査した結果、深度方向と比較して自己相関性が非常に強く、数10m程度以内範囲ではほぼ均一と見なしてよい⁹⁾ことから、同一の層と見なす。

図-2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図-3に示すとおりである。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る。転倒が支配的な断面は3例のみであり、支持力が支配的な断面はない。この被災モードの傾向は実際の被災傾向¹⁰⁾と整合的である。

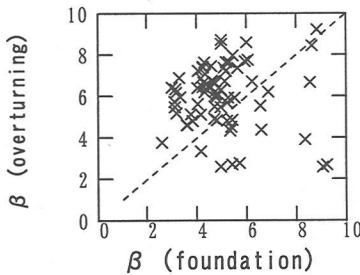
次に3つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率を算出する。システム破壊確率の算出にあたり各モードの相関が無視し得ない場合は、複数のモードの結合分布を考慮する必要がある。Ditlevsen¹¹⁾は結合確率の上下限値を示しており、鈴木ら¹²⁾は結合確率の算定式を提案している。本研究で扱う防波堤の外的安定に関しては、図-3に示したように相互の相関は低いことから、各モードを完全独立と仮定しても十分な精度でシステム破壊確率の算出が行えるものと判断した。3つの破壊モードを総合したシステム破壊確率は式(4)により算出される。



(a) 滑動安全性指標に対する支持力安全性指標



(b) 滑動安全性指標に対する転倒安全性指標



(c) 支持力安全性指標に対する転倒安全性指標

図-3 各安全性指標の相関

$$P_f = 1 - (1 - P_{fs})(1 - P_{ft})(1 - P_{ff}) \quad (4)$$

ここに、

- P_f : システム破壊確率
- P_{fs} : 滑動破壊確率
- P_{ft} : 転倒破壊確率
- P_{ff} : 支持力破壊確率

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-4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⁹⁾と調和的であり、滑動・転倒・支持力のすべての破壊モードを考慮したシステム安全性指標は適切に算定さ

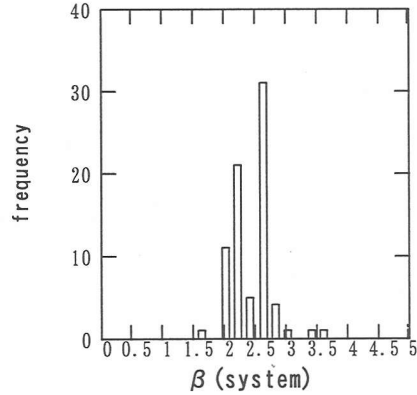


図-4 システム安全性指標の分布

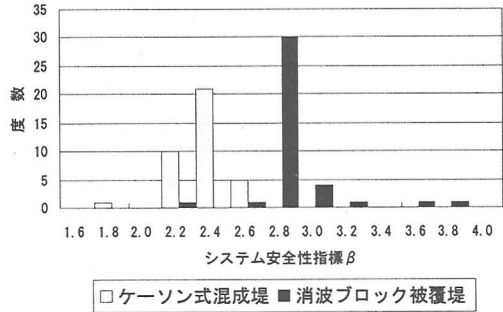


図-5 構造形式別のシステム安全性指標比較

れたものと判断される。

図-5には構造形式別のシステム安全性指標の分布を示す。波力算定式の精度が表-1に示したように構造形式により異なるため、消波ブロック被覆堤の安全性指標はケーソン式混成堤の安全性指標よりも大きな値を示す。これは、消波ブロック被覆堤の破壊確率はケーソン式混成堤と比較して1オーダー低い値である¹⁰⁾という被災事例による傾向と調和的である。システム安全性指標と各破壊モードに対する安全性指標との関係を図-6に示す。ほとんどの断面で滑動が支配的であることから、システム安全性指標と滑動安全性指標の相関が強い。

以下では信頼性設計法によるコードキャリブレーションを行うが、信頼性設計法における目標安全性水準の定め方としては、現行設計法の安全性水準の平均レベルを目標とする方法が最も有力である。その場合、信頼性設計法導入後の建設コストは平均的に従来と同程度となり、過大もしくは危険な設計の割合が減少する点が導入効果として期待される。一方、建設コストを縮減する目的からは、ある最低の安全性水準を設定して、それを下回る

4. レベル2信頼性設計法の適用

レベル2信頼性設計法では、各破壊モードの安全性指標 $\beta_{element}$ の値を判定基準とし、これが目標値 β_T を上回ることを確認する。

$$\min \beta_{element} \geq \beta_T \quad (5)$$

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(5)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。堤体幅の刻み幅は上述の現行設計法の補正と同様に 5cm とした。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(6)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(7)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。

$$\sum (P_{\beta} - P_{\beta_T})^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

ここに、

P_{β} : システム破壊確率の目標値

P_{β_T} : 信頼性設計法によるシステム破壊確率

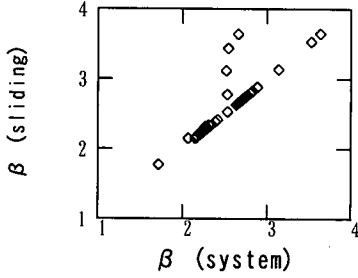
$$|P_{f5\%p} - P_{f5\%r}| \rightarrow \min \quad (7)$$

ここに、

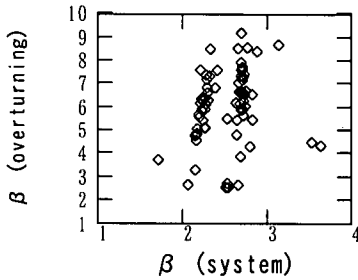
$P_{f5\%p}$: 現行設計法によるシステム破壊確率の 5% 超過確率

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

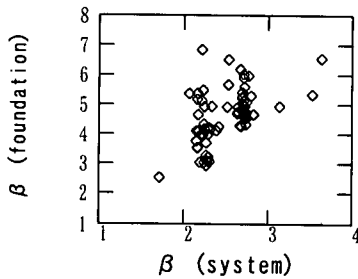
解析結果を図-7に示す。水平軸は目標安全性指標であるが、左端の現行と記した部分は現行設計法による値であることを示す。鉛直軸にはシステム安全性指標の平均値及び 5%非超過確率値、および現行設計法による堤体重量を 1.0 とした場合の信頼性設計法による堤体重量の



(a) システム安全性指標に対する滑動安全性指標



(b) システム安全性指標に対する転倒安全性指標



(c) システム安全性指標に対する支持力安全性指標

図-6 システム安全性指標と各破壊モード安全性指標の相関

割合を現行設計法と同程度にする方法が考えられる。本研究ではこの2つの手法により設計法のキャリブレーションを行うが、後者の方法における安全性の最低水準は 5%超過確率に相当する破壊確率 (2.30×10^{-3}) 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、目標安全性指標を破壊モード毎に変えることは合理的とは考えられない。このため、本研究においては、各破壊モードに対して目標安全性指標は同じ値とする。

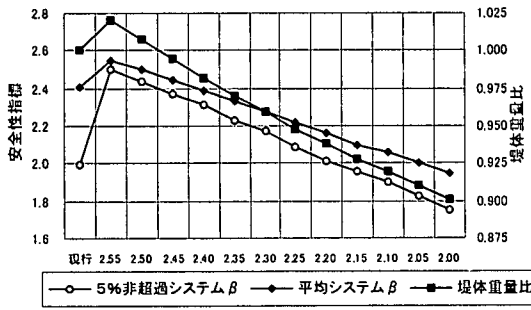


図-7 解析結果 (レベル2)

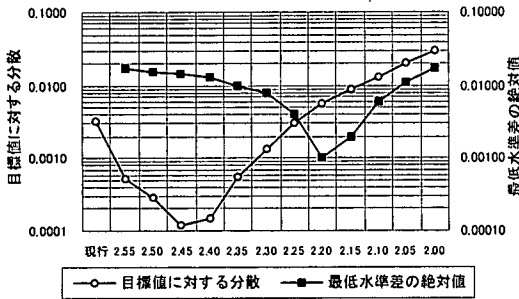


図-8 最適案の判定 (レベル2)

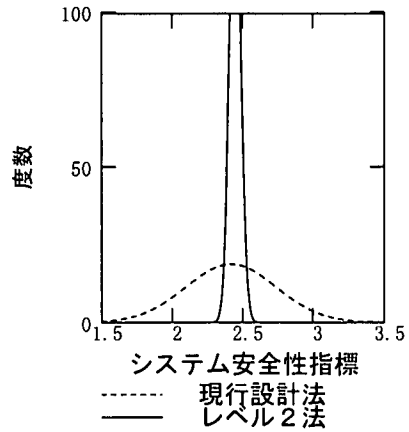
平均値を示している。目標安全性指標を下げるに従って、システム安全性指標、堤体重量比も比例的に下がることが分かる。図-8に、各キャリブレーション条件の最適案の判定結果を示す。平均値キャリブレーションについては目標安全性指標2.45のケースが、最低水準キャリブレーションについては目標安全性指標2.20のケースが適合する。前者の堤体重量比平均値は0.99とほぼ現行設計法と同じに保たれており、建設コストは変えずに合理的な設計が行えることを示している。後者の堤体重量比平均値は0.94であり、現行設計法と比較して平均的に6%の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-9に示した。

5. レベル1信頼性設計法の適用

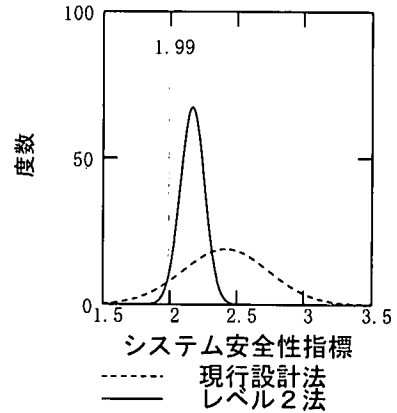
レベル1信頼性設計法の安全性照査式の基本を示すと式(8)~式(10)ようになる。分離係数は、性能関数を線形化近似する際に導入される係数である。

$$\gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k \quad (8)$$

$$\gamma_R = \left(1 - \alpha_R \beta_T \frac{\sigma_R}{\mu_R} \right) \frac{\mu_R}{R_k} \quad (9)$$



(a) 平均値設定によるキャリブレーション



(b) 最低水準設定によるキャリブレーション

図-9 キャリブレーション結果

$$\gamma_S = \left(1 + \alpha_S \beta_T \frac{\sigma_S}{\mu_S} \right) \frac{\mu_S}{S_k} \quad (10)$$

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

β_T : 目標安全性指標

α_R, α_S : 分離係数 (0.7~0.75程度)

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(11)~式(13)ようになる。

$$\begin{aligned} & \gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \\ & \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \end{aligned} \quad (11)$$

$$a \sum_i \gamma_{w_i} W_{ik} - b P_{Bd} - c \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq d \gamma_{P_H} P_H \quad (12)$$

$$\sum \left\{ \left[\gamma_c c'_k s + (\gamma_{w_r} w'_k + \gamma_{q_R} q_k) \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k \right] \times \sec \theta / \left(1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k / F_f \right) \right\} / \left\{ \sum (\gamma_{w_s} w'_k + \gamma_{q_s} q_k) \sin \theta + e \gamma_{P_H} P_H / r \right\} \geq F_f \quad (13)$$

ここに、記号 γ はその添え字に関する安全係数であり、添え字 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式(1)～式(3)と同一である。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(14)により得られる。

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{w\ell} w\ell_k + h) B \quad (14)$$

ここに、

- ρ_w : 海水密度(t/m^3)
- g : 重力加速度(m/s^2)
- $w\ell$: 設計潮位(m)
- h : 堤体設置水深(m)
- B : 堤体幅(m)

安全係数として、施設の重要度を表現する構造物係数を考慮することも考えられるが、ここでは適用外としている。転倒安全性照査における各荷重のアーム長、支持力安全性照査における分割細片の幅、分割細片が底面となす角、水平荷重のアーム長、すべり円弧の半径は確定値として扱うため、安全係数は適用しない。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異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、収束計算により求める。

各モードに対する安全係数は、安全性照査式(11)～式(13)を式(9)～式(10)で述べた分離係数を導入することによって設定するが、性能関数の非線形性などのため簡単な形で線形化近似を行うことはできない。このため、そ

れぞれを展開する際に生じる高次の項を無視することによって、式(15)～(17)のように設定した。

(滑動安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_f &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_f) \mu_f / f_k \\ \gamma_{w_i} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{w_i}) \mu_{w_i} / W_{ik} \\ \gamma_{P_U} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{P_U}) \mu_{P_U} / P_{Uk} \\ \gamma_{w\ell} &= (1 + \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{w\ell}) \mu_{w\ell} / w\ell_k \\ \gamma_{P_H} &= (1 + \alpha \beta_T V_{P_H}) \mu_{P_H} / P_{Hk} \end{aligned} \quad (15)$$

(転倒安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_{w_i} &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_{w_i}) \mu_{w_i} / W_{ik} \\ \gamma_{P_U} &= (1 + \alpha \alpha' \beta_T V_{P_U}) \mu_{P_U} / P_{Uk} \\ \gamma_{w\ell} &= (1 + \alpha \alpha' \beta_T V_{w\ell}) \mu_{w\ell} / w\ell_k \\ \gamma_{P_H} &= (1 + \alpha \beta_T V_{P_H}) \mu_{P_H} / P_{Hk} \end{aligned} \quad (16)$$

(支持力安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_c &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_c) \mu_c / c'_k \\ \gamma_{\tan \phi'} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta_T V_{\tan \phi'}) \mu_{\tan \phi'} / \tan \phi'_k \\ \gamma_{w_r} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \alpha''' \beta_T V_{w_r}) \mu_{w_r} / w'_k \\ \gamma_{q_R} &= (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \alpha''' \beta_T V_{q_R}) \mu_q / q_k \\ \gamma_{w_s} &= (1 + \alpha \alpha' \beta_T V_{w_s}) \mu_{w_s} / w'_k \\ \gamma_{q_s} &= (1 - \alpha \alpha' \beta_T V_{q_s}) \mu_q / q_k \\ \gamma_{P_H} &= (1 + \alpha \alpha' \beta_T V_{P_H}) \mu_{P_H} / P_{Hk} \end{aligned} \quad (17)$$

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(11)～式(13)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 および堤体幅の刻み幅についてもレベル 2 の検討と同様とした。

解析結果を図-10 に示す。水平軸および鉛直軸は図-7 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-11 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

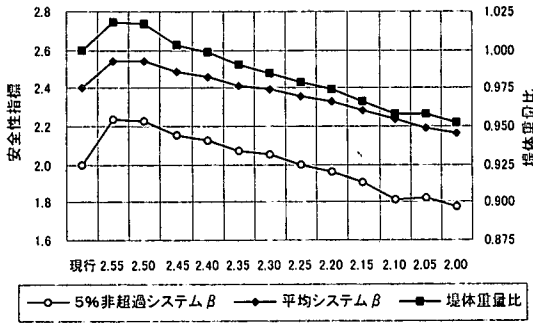


図-10 解析結果 (レベル1)

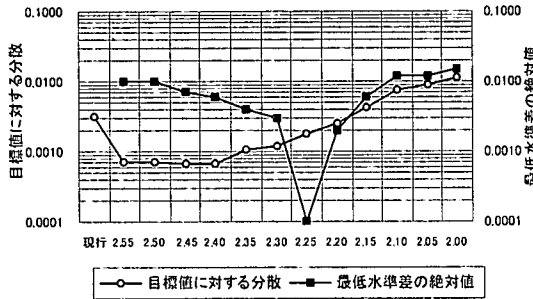
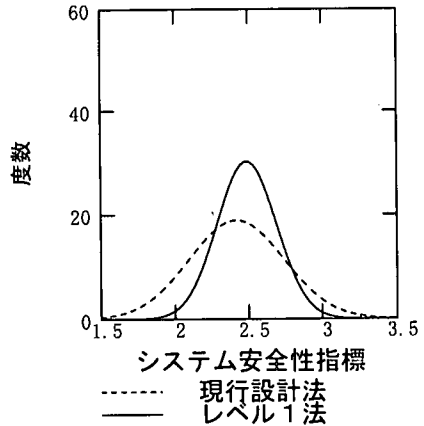


図-11 最適案の判定 (レベル1)

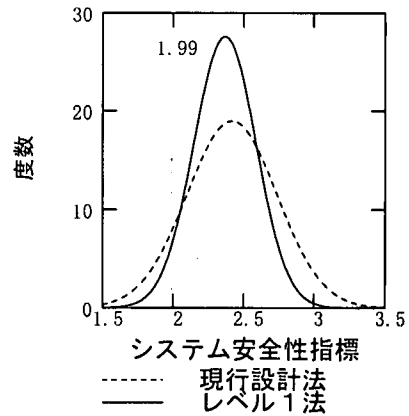
安全性指標 2.45 のケースが、下限値キャリブレーションについては目標安全性指標 2.25 のケースが適合する。これはレベル 2 の方法の場合とほぼ同じ結果となった。平均値キャリブレーションの堤体重量比平均値は 1.00 であり、現行設計法と建設コストは変わらないが、目標値に対する分散には 1 オーダーの差があり、現行設計法よりも合理的な設計が行える。下限値キャリブレーションの堤体重量比平均値は 0.98 であり、現行設計法と比較すると 2% 程度の建設コスト縮減が可能になる。各キャリブレーション条件の信頼性設計法と現行設計法による安全性指標分布の比較を図-12 に示した。これまでの結果をまとめて、表-2 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。

6. 各レベルの方法の比較

各レベルの方法の適用性を比較してみる。図-13 にレベル 1 およびレベル 2 の方法のシステム安全性指標の分布を示す。システム安全性指標の標準偏差は、現行設計法で 0.31 であり、レベル 2 の方法では、平均値設定で 0.04、最低水準設定で 0.09 と現行設計法に比較して非常に小さく、適用にあたっての利点は大きい。一方レベル 1 の方



(a) 平均値設定によるキャリブレーション



(b) 最低水準設定によるキャリブレーション

図-12 キャリブレーション結果

法のシステム安全性指標の標準偏差は、平均値設定の場合 0.20、最低水準設定の場合 0.22 である。まず平均値設定の場合は、システム安全性指標の標準偏差の比較および 5. で述べた目標破壊確率に対する分散の比較から、適用性は十分に高いと判断される。つぎに最低水準設定についてであるが、システム安全性指標の分布に正規分布をあてはめた図-12 などからは読みとれないが、図-13 を見ればわかるように、レベル 2 の方法ではシステム安全性指標が 2.0 を下回る断面が数例あるのに対し、レベル 1 の方法では 2.0 を下回る断面は存在しない。システム安全性指標で 2.5 を超える施設が多いことが標準偏差を大きくしている原因であり、危険な施設の数がかえって少ないといえる。

表-2 設計法の提案

(a) レベル1法による安全係数

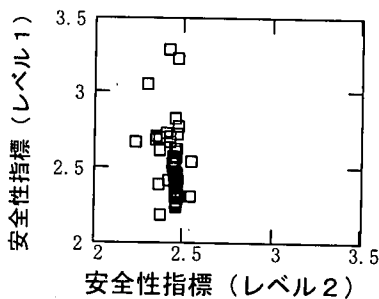
			平均値 設定	最低水準 設定
滑動	波力	混成堤・緩	1.08	1.05
		混成堤・急	1.20	1.17
		消波ブロック堤・緩	0.93	0.91
		消波ブロック堤・急	1.04	1.02
	摩擦係数		0.87	0.88
	揚圧力	混成堤・緩	0.92	0.91
		混成堤・急	1.02	1.00
		消波ブロック堤・緩	0.82	0.81
		消波ブロック堤・急	0.90	0.89
	潮位	$r_w=1.5$	1.17	1.15
		$r_w=2.0\sim 2.5$	1.34	1.31
	自重	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
		無筋コンクリート	1.00	1.00
中詰砂		0.99	0.99	
転倒	波力	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	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
	自重	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
	潮位	$r_w=1.5$	1.24	1.22
		$r_w=2.0\sim 2.5$	1.48	1.44
支持力	波力	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	滑動側	0.81	0.81
		抵抗側	0.72	0.72
	自重	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

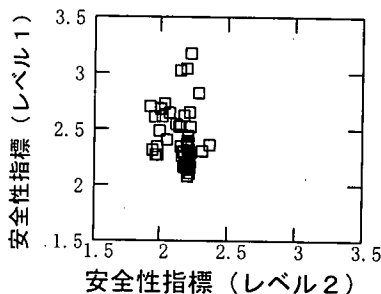
(b) レベル2法による目標安全性指標

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

両者の差は建設コストに反映されており、経済性を強く優先させる場合はレベル2の方法が有力であるが、手法としての簡易性を考慮すると、最低水準設定についてもレベル1の方法の適用性は高いものと判断される。



(a) 平均値設定



(b) 最低水準設定

図-13 各方法の比較

7. まとめ

本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

- ① 現行設計法による防波堤のシステム安全性指標は、再現期間 50 年の波高を持つ波の襲来に対して、平均的に 2.4 程度、標準偏差 0.3 程度の値を持つ。
- ② 現行設計法と信頼性設計法で総合的な安全性水準の平均値を一致させる方法、最低水準を一致させる方法のそれぞれについて、レベル1、レベル2の信頼性設計法によるコードキャリブレーションを行い、表-2に示す安全係数、および目標安全性指標を提案する。
- ③ レベル1およびレベル2の方法の適用性を比較すると、合理性という観点からはレベル2の方法の有利性は明らかであるが、レベル1の方法を用いても現行設計法より十分に合理的な設計を行うことが可能である。
- ④ 最低水準を一致させる方法を採用した場合、現行設計法に比較して堤体重量で2~6%程度のコスト縮減が可能である。

謝辞：本研究のとりまとめに際し、京都大学防災研究所 嘉門教授に御指導いただきましたことを感謝します。

参考文献

- 1) 高山知司, 鈴木康正, 河合弘泰, 藤咲秀可: 防波堤の信頼性設計に向けて, 港湾技研資料, No.785, 1994.
- 2) Cornell, C. A.: A Probability-Based Structural code, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.66, No.12, pp.974-985, 1969.
- 3) 長尾 毅, 大久保昇, 川崎 進, 林由木夫: 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第3報)～レベル1, 2の設計法の適用性総括～, 港湾技術研究所報告, Vol.37, No.2, pp.131-176, 1998.
- 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.
- 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. (2000.11.6 受付)
- 7) 堀川 洋, 神田勝己, 堀家 正: ケーソン式混成防波堤構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料, No.644, 1989.
- 8) 土田 孝, 湯 怡新: 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.35, No.1, pp.117-146, 1996.
- 9) 奥村樹郎, 土田 孝: 土質定数のばらつきを考慮した不同沈下の推定, 港湾技術研究所報告, Vol.20, No.3, pp.131-168, 1981.
- 10) 河合弘泰, 高山知司, 鈴木康正, 平石哲也: 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, Vol.36, No.4, pp.3-41, 1997.
- 11) Ditlevsen, O.: System Reliability Bounding by Conditioning, *Proc. of ASCE*, Vol.108, No.EM5, pp.708-718, 1982.
- 12) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の安全性評価法および RC 橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.71-87, 1997.

RELIABILITY BASED DESIGN WAY FOR CAISSON TYPE BREAKWATERS

Takashi NAGAO

This paper presents the design way of breakwaters to evaluate the safety against sliding, overturning, and foundation failure through the reliability based design method. By using the probability distributions of design parameters such as wave force, deadweight, coefficient of friction and so on, distribution of safety indices of breakwaters designed with conventional design method has been clarified. Target safety indices have been determined in two ways; ①mean value of safety indices with reliability based design method and that with conventional design method are to conform to each other, ②5th percentile value of safety indices with reliability based design method and that with conventional design method are to conform to each other. Code calibration has been carried out for each way, and safety factors for level 1 reliability design method and target safety indices for level 2 design method have been proposed.