

1. はじめに

港湾の技術基準の性能規定化に伴い、重力式防波堤の外的安定性の標準的な照査方法は、従来の安全率法からレベル1信頼性設計法（部分係数法、以下、レベル1設計法と略記）に移行する。レベル1設計法は、信頼性設計法の中でも最も平易な設計法で、部分係数を用いた安全性照査式によって安全性を評価する方法である。重力式防波堤の部分係数は、既往の研究¹⁸⁾により、一般的な5形式（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）についての標準値が提示されている。しかし、これら以外の形式に関する部分係数は、新たに算出する必要がある。部分係数の算出においては、波力算定式の推定精度の評価を適切に行うことが重要となる。この波力算定式推定精度は、波力算定式による計算値と、現地観測や水理模型実験の結果を用いて評価されるが、近年開発された、複数の構造的特徴を有するような特殊な形式の防波堤の場合、研究例が数少なく十分なデータが得られない場合が多い。

そこで本研究は、図-1に示す消波ブロック被覆上部斜面堤を例にとり、複数の構造的特徴を有する重力式防波堤の波力算定式推定精度を、その構造的特徴を個別に有する重力式防波堤の波力算定式推定精度から評価する方法について検討を行う。さらに、その結果を用いて信頼性解析を実施し、消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係

数を算出する。また、信頼性解析を行わず簡便な方法で部分係数を求める方法について検討し、信頼性解析を実施して求めた部分係数との比較検討を行う。

以下、2. では、消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度の評価方法、および評価結果について述べる。3. ～5. では、吉岡ら¹⁸⁾の方法と同様にして消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係数を算出しており、3. では、信頼性設計法の概要について述べる。4. では、2章で定めた波力算定式の推定精度をもとに、安全率に基づく現行設計法が担保する安全性水準をシステム信頼性指標によって評価する。さらに、各破壊モード別の比較や破壊モード間の相関性について検討を実施する。5. では、前章で定めた現行設計法の平均信頼性指標を目標値として、部分係数のコードキャリブレーションを実施する。6. では、簡便な方法で部分係数を求め、前章で求めた部分係数との比較検討を実施する。

2. 波力算定式の推定精度

2.1 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式

消波ブロック被覆上部斜面堤は、図-1に示すように上部斜面堤を消波ブロックで被覆した重力式防波堤であり、消波ブロック被覆堤と上部斜面堤の複合形式といえる。この防波堤は、斜面効果による耐波安定性に加え、消波ブロックの被覆により波力および反射率の低減を図っている。また、直立壁堤に比べて堤体幅を縮小できるため、

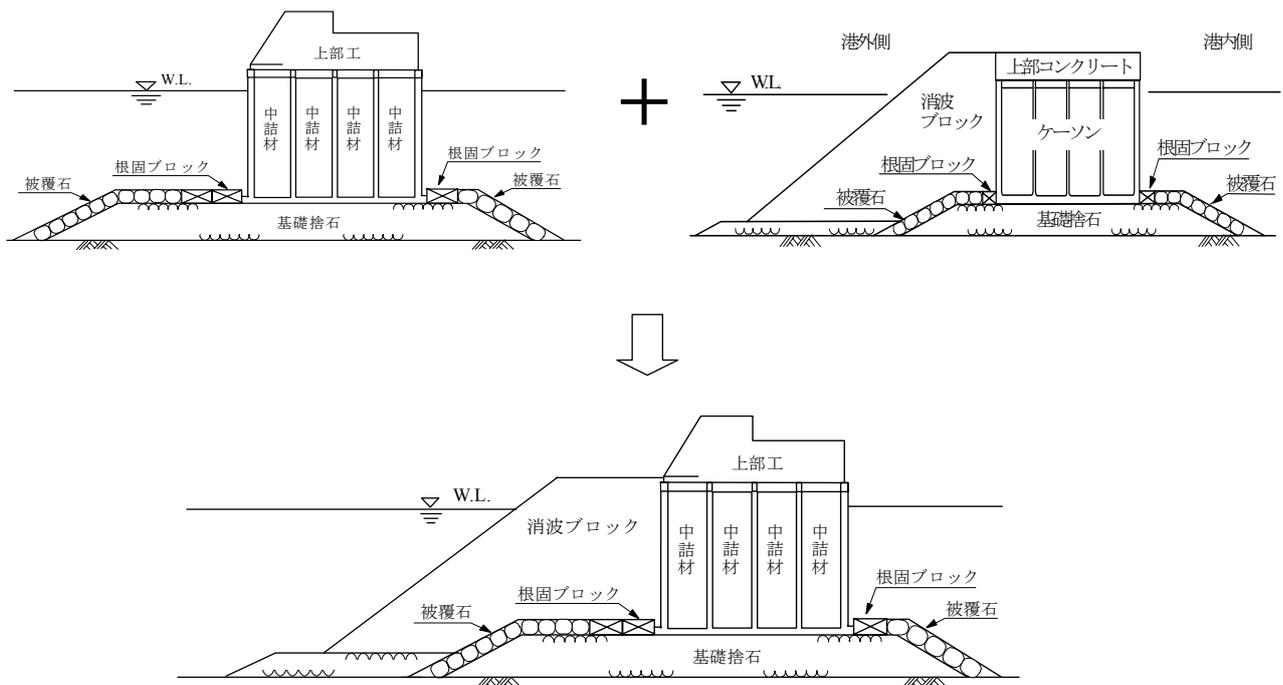


図-1 消波ブロック被覆上部斜面堤

大水深域での施工に有利であるが、越波伝達波が増加するという欠点もある。

消波ブロック被覆上部斜面堤に作用する波圧分布の模式図を図-2に示し、波力の算定方法について以下に概説する。

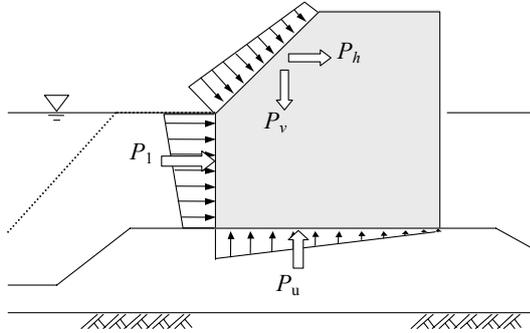


図-2 消波ブロック被覆上部斜面堤の波圧分布

まず、合田式によって、消波ブロック被覆上部斜面堤の直立壁に作用する波力 P_1 と、斜面壁を直立面に投影した面積に作用する波力 P_2 を算出する。次に、波力 P_2 は斜面平行成分と斜面直交成分に分解され、そのうちの斜面直交成分のみが堤体に作用するというモデルのもと、水平波力 P_H および鉛直下向き波力 P_V を算出する。以上によって求めた斜面部の波力は、波高水深比が小さくなる場合、水理模型実験結果に比べて過小な評価となることから、佐藤ら⁷⁾は、 P_2 に乗じる波力割増係数 λ_{FS} を提案している。また、直立部の波力の低減係数 λ_v は、高橋ら⁸⁾の通常の消波ブロック被覆堤の波力低減係数と同様の傾向を示すことが確認されている。佐藤ら⁷⁾による消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式は式(1)~(3)のとおりである。

$$\begin{cases} P_1 = \lambda_v P_0 & (1) \\ P_h = \lambda_{FS} P_2 \sin^2 \theta & (2) \\ P_v = 0.5 \lambda_{FS} P_2 \sin 2\theta & (3) \end{cases}$$

ここに、

- P_0 : 合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち消波ブロック被覆上部斜面堤の直立部に対応する部分 (kN/m)
- P_1 : 消波ブロック被覆上部斜面堤の直立部に作用する波力 (kN/m)
- P_2 : 合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち消波ブロック被覆上部斜面堤の斜面部に対応する部分 (kN/m)
- P_h : 斜面部に作用する波力の水平成分 (kN/m)

P_v : 斜面部に作用する波力の鉛直成分 (kN/m)

θ : 斜面部の勾配 ($^\circ$)

λ_v : 通常の消波ブロック被覆堤の波力低減係数

λ_{FS} : 斜面部に作用する波力の割増係数で次式によって定義される。

$$\begin{cases} H_{max}/h \leq 0.35 & \lambda_{FS} = 2.0 & (4) \\ 0.35 \leq H_{max}/h \leq 0.65 & \lambda_{FS} = -10H_{max}/(3h) + 19/6 & (5) \\ 0.65 \leq H_{max}/h & \lambda_{FS} = 1.0 & (6) \end{cases}$$

ここに、

H_{max} : 最高波高 (m)

h : 直立壁前面での水深 (m)

2.2 推定精度の評価

吉岡ら¹⁸⁾は、既往の研究事例を収集し、水理模型実験による波力の実験値 P_E と波力算定式による計算値 P_C との比によって、波力算定式推定精度を評価している。しかし、消波ブロック被覆上部斜面堤の水理模型実験の実施例は数少なく、波力算定式推定精度を適切に評価するためのデータが不足しているのが現状である。

そこで、本研究ではまず、消波ブロック被覆上部斜面堤の2つの構造的特性（消波ブロック被覆特性、上部斜面特性）を個別に有する防波堤である、消波ブロック被覆堤、上部斜面堤のうち、上部斜面堤の波力算定式¹⁾（式(7)~(9)）に注目する。同式によると、上部斜面堤の直立部、斜面部の波力は、合田式により計算されるケーソン式混成堤の波力 P_0 、 P_2 に、波力の補正係数 λ_v 、 λ_{SL}' を乗じる形で求められる。

$$\begin{cases} P_1 = \lambda_v P_0 & (7) \\ P_H = \lambda_{SL}' P_2 \sin^2 \theta & (8) \\ P_V = 0.5 \lambda_{SL}' P_2 \sin 2\theta & (9) \end{cases}$$

ここに、

- P_0 : 合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち上部斜面堤の直立部に対応する部分 (kN/m)
- P_1 : 上部斜面堤の直立部に作用する波力 (kN/m)
- P_2 : 合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち上部斜面堤の斜面部に対応する部分 (kN/m)
- P_H : 斜面部に作用する波力の水平成分 (kN/m)
- P_V : 斜面部に作用する波力の鉛直成分 (kN/m)
- θ : 斜面部の勾配 ($^\circ$)
- λ_{SL}' 、 λ_v : 斜面部および直立部に作用する波力の補正係数で次式によって定義される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_v = \min[1.0, \max\{1.1, 1.1 + 11d_c/L\} - 5.0H/L] \quad (10) \\ \lambda_{SL}' = \min[\max\{1.0, -23H/L \tan^2 \theta \\ + 0.46 \tan^2 \theta + \sin^2 \theta\}, \sin^2 \theta] \quad (11) \end{array} \right.$$

ここに、

H : 波高 (m)

L : 波長 (m)

d_c : 静水面から斜面下端までの高さ(m)

ここで、上部斜面堤の波力算定式推定精度の確率分布は、ケーソン式混成堤の波力算定式推定精度の確率分布と、上部斜面堤の波力補正係数の推定精度の確率分布との積の関係で求められ、式(7)~(9)の波力および波力の補正係数を互いに独立な確率変数と考えると、その平均値と変動係数は、式(12),(13)により算出される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{XY} = \mu_X \cdot \mu_Y \quad (12) \\ V_{XY} = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \quad (13) \end{array} \right.$$

ここに、

μ : 平均値

V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

ここで、上部斜面堤の波力補正係数の推定精度は、上部斜面構造を有する防波堤の、波力算定式推定精度の特性を表しているものと考えられる。このことから、消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度は、上部斜面堤の波力補正係数の推定精度と、消波ブロック被覆堤(斜面部は消波ブロックで被覆されていないためケーソン式混成堤)の波力算定式推定精度を、式(12),(13)を用いて合成することにより評価できると考えられる。

以上より、次項ではまず、上部斜面堤の斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を評価する。次に、上部斜面堤の波力の補正係数の推定精度を評価し、消波ブロック被覆上部斜面堤およびケーソン式混成堤の波力算定式推定精度を用いて消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度を評価する。なお、斜面部に作用する波力の鉛直成分と水平成分は同様の確率分布に従うことから、斜面部の波力算定式推定精度は斜面部に作用する波力の水平成分で評価している。

(1) 上部斜面堤の波力算定式推定精度

上部斜面堤の波力の実験値 P_E と波力算定式による計算値 P_C との比によって、上部斜面堤の波力算定式推定精度

(斜面部、直立部別)を評価する。水理模型実験データは、中田ら¹³⁾より2データ、大堀ら²⁾より13データ、細山田ら¹⁵⁾より4データを収集し、計19データによって評価した。上部斜面堤の斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を表-1に示す。

表-1 上部斜面堤の波力算定式推定精度

	斜面部	直立部
$\mu^{※1}$	0.60	1.04
$V^{※2}$	0.33	0.13

※1) μ : 平均値

※2) V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

(2) 上部斜面堤の波力補正係数の推定精度

上部斜面堤の波力補正係数の推定精度は、前項で求めた上部斜面堤の波力算定式推定精度と、ケーソン式混成堤の波力算定式推定精度(表-4参照)、および式(12),(13)を用いて表-2のように評価される。なお、上部斜面堤の直立部の波力に関する変動係数($V=0.13$)は、混成堤の波力に関する変動係数($V=0.19$)よりも小さいため、ここでは直立部の波力補正係数の推定精度のばらつきは無視して $V=0$ としている。

表-2 上部斜面堤の波力補正係数の推定精度

	λ_{SL}'	λ_v
$\mu^{※1}$	0.66	1.14
$V^{※2}$	0.27	0

※1) μ : 平均値

※2) V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

(3) 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度

前項で求めた上部斜面堤の波力補正係数の推定精度と、ケーソン式混成堤(斜面部)、消波ブロック被覆堤(直立部)の波力算定式推定精度(表-4参照)、および式(12),(13)を用いて消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度は表-3のように評価される。

表-3 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度(斜面部、直立部別)

	斜面部	直立部
$\mu^{※1}$	0.60	0.96
$V^{※2}$	0.33	0.12

※1) μ : 平均値、

※2) V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

ここで、表-3に示す、斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を、斜面部および直立部に作用する波力の比0.27を用いて案分する(詳細は付録B参照)ことにより、

波圧作用面全体（斜面部+直立部）の波力算定式推定精度を評価し表-4に示す。なお、ここで用いる波力の比は、表-1に示す上部斜面堤の波力算定式推定精度を評価する際に用いた、計算波力から求めた値である。

同表には比較のため、一般的な5形式¹⁸⁾についての値も併記しているが、消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度の平均値の偏りは、他の形式と比較して小さく、消波ブロック被覆堤と同程度の値となっている。このことから、消波ブロック被覆形式の防波堤には、安全性の余裕度が比較的大きく見込まれていることがわかる。また、変動係数に関しても消波ブロック被覆形式の値が、他の形式と比較して小さくなっている。波力算定式による波力推定時のばらつき程度には、砕波圧や衝撃砕波圧の推定精度が大きく寄与するものと考えられるため、これらの影響をほとんど受けない消波ブロック被覆形式のみ、波力算定式推定精度の変動係数が小さくなっているものと考えられる。

表-4 波力算定式推定精度の比較

構造形式	$B^{※1}$	$V^{※2}$
消波ブロック被覆上部斜面堤	0.89	0.11
ケーソン式混成堤 ^{※3}	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤 ^{※3}	0.84	0.12
上部斜面堤 ^{※4}	0.96	0.18
直立消波ブロック堤 ^{※4}	0.97	0.18
消波ケーソン堤 ^{※4}	0.97	0.16

※1) B : 平均値の偏り (平均値/特性値)

※2) V : 変動係数 (標準偏差/平均値)

※3) Takayama・Ikeda²⁶⁾, ※4) 長尾¹²⁾

3. 信頼性設計法の概要

3.1 信頼性設計法の設計レベル

信頼性設計法は構造物の破壊可能性、言い換えれば安全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(表-5)。

最も高位に属するレベル3設計法は、構造物の破壊確率 P_f によって安全性を制御する方法である。これは最も精緻な方法であるが、確率変数が多数である場合、その同時確率を解析的に算出するためには、高度な作業を必要とする。また、近年の計算機能力の向上に伴い、モンテカルロシミュレーションによって破壊確率を算出することが可能となり、その高速化に関して多数の研究がなされている(例えば、吉田ら²⁰⁾) が、この方法も広義に

表-5 信頼性設計法の3つのレベル

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	$\beta \leq \beta_T$	信頼性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$ $\Leftrightarrow \gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k$	設計用値 部分係数

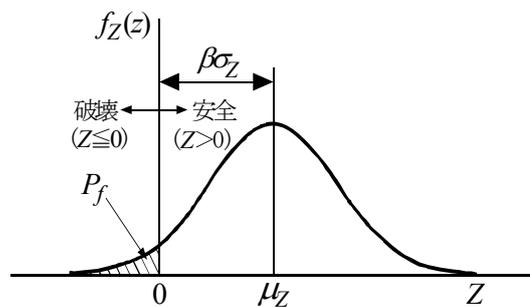


図-3 信頼性指標

はレベル3設計法に属する。

レベル2設計法は、信頼性指標 β によって安全性を制御する方法である。信頼性指標 (reliability index) は、図-3に示すように破壊領域と安全領域の境界点から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) に基づき次式によって算出される²⁵⁾。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \tag{14}$$

ここに、 Z : 性能関数, μ : 平均値, σ : 標準偏差

式(14)より明らかなように、信頼性指標 β を得るためには、性能関数 Z の標準偏差 σ_Z を求める必要があるが、設計因子(確率変数)が正規分布や対数正規分布以外の確率分布に従う場合や、性能関数が非線形である場合には、性能関数 Z としての確率分布が正規分布に従わないため、 σ_Z を得ることはできない。したがって、FORMでは以下に示す近似を行う。

- ① 性能関数 Z を確率変数 X_i に関してテーラー展開し、1次の項で打ち切り、線形化する(線形化近似)。
- ② 正規確率密度関数以外の分布を持つ確率変数を、正規確率変数で近似する(正規化近似)。
- ③ 確率変数間に相関がある場合は、変数変換によって独立な確率変数とする(変数変換)。

以上の近似により、性能関数 Z の確率分布が正規分布に近似され、 σ_z を得ることが可能となる。

このような性能関数の正規化近似により、破壊確率 P_f と信頼性指標 β には次式に示す関係式が得られ、この関係を図示すると図-4となる。図より、信頼性指標が大きくなるほど破壊確率は小さくなることがわかる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (15)$$

ここに、 Φ ：標準正規確率分布関数

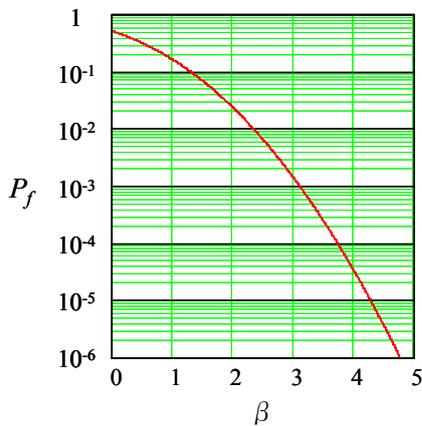


図-4 破壊確率と信頼性指標の関係

最も平易なレベル1設計法は、部分係数 γ を用いた安全性照査式によって安全性を制御する方法である。各設計因子の特性値に部分係数を乗じて得られる値は、設計用値と呼ばれる。設計計算においては、耐力の設計用値 R_d が荷重効果の設計用値 S_d を上回ることを確認する。次章以降で詳述するように、部分係数の設定においてはレベル2以上の確率統計解析が必要であるが、設計者にとっては、設定された部分係数を用いて設計を実施すればよいから、直接確率統計手法を必要としない。したがってレベル1設計法は、言わば準確率論的な設計法である。

3.2 一次信頼性理論 (FORM)

まず、正規確率変数 X_i を次式によって平均値0、標準偏差1に標準化する。

$$X_i' = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (16)$$

以下では、 X_i' によって表される空間を標準化空間と呼

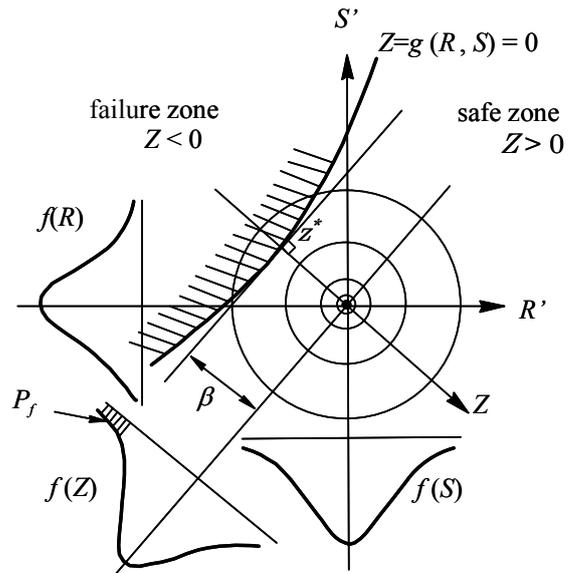


図-5 2変数の場合の標準化空間

ぶ。性能関数が $Z = g(R, S)$ (R ：耐力、 S ：作用効果)によって定義される場合、標準化空間における破壊確率 P_f と信頼性指標 β との関係は、図-5のように表される。図中の原点を中心とする同心円は、 R と S の同時確率密度線である。破壊領域($Z < 0$)における同時確率が破壊確率 P_f であり、 R と S が独立な場合、標準化空間では次式によって定義される。

$$P_f = \iint_{Z \leq 0} \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(R'^2 + S'^2)\right) dR' dS' \quad (17)$$

Z が非線形である場合には、式(17)は必ずしも解析的に解ける問題のみではないため、 Z を線形化近似し、さらに破壊線($Z=0$)に対して座標軸が直交するように座標変換することによって、式(15)が導かれる。したがって、信頼性指標 β は式(15)に示す標準正規確率分布関数の説明変数であるとともに、標準化空間においては原点すなわち平均値から破壊点までの距離を表す。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Cornell²⁰⁾タイプと、破壊点周りの線形化近似に基づくHasofer-Lind²³⁾タイプに大別される。前者はFOSM法 (First-Order Second-Moment method) あるいは2次モーメント法とも呼ばれ、後者はAFOSM法 (Advanced First-Order Second-Moment method) とも呼ばれる。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、正規確率変数間に相関

がない場合には式(18)によって定義される¹⁴⁾。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (u_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (18)$$

ここに、 X^* ：確率変数 X の破壊点における値

式(18)における破壊点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標準偏微分係数であり、確率変数間に相関がない場合には、次式によって定義される。

$$\alpha_{X_i} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19a)$$

$$= - \left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \right) / \beta \quad (19b)$$

式(19b)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 $Z = g(R, S)$ によって定義される場合には、図-6に示す関係となる。

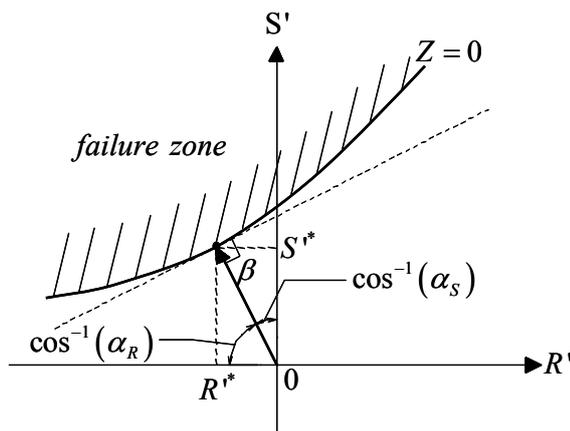


図-6 感度係数

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、荷重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-6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した値が信頼性指標に一致する傾向となり、信

頼性指標におよ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(20)、(21)で表される¹⁰⁾。

$$\sigma'_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} \sigma_{X_i}} \quad (20)$$

$$\alpha'_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} / \sigma'_Z \quad (21)$$

4. 現行設計法による安全性水準

4.1 検討方法

信頼性解析は、吉岡ら¹⁸⁾の方法と同様に、波力算定式推定精度(表-4)および長尾¹²⁾によってまとめられているその他の設計因子の従う確率分布(表-6)をもとに、FORMに基づき、Hasofer-Lindタイプの信頼性指標を算出する。ここで、考慮する破壊モードは、図-7に示した防波堤の外的安定を表す3つの破壊モード、滑動、転倒、支持力破壊であり、それぞれの性能関数は、港湾の施設の技術上の基準¹⁾に従い、式(22)~(24)によって定義する。

表-6 他の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
潮位 (w_l)		
$r_{wl}=1.5$	1.00	0.20
$r_{wl}=2.0, 2.5$	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 (W_{RC})	0.98	0.02
無筋コンクリート (W_{NC})	1.02	0.02
中詰砂 (W_{SAND})	1.02	0.04
基礎地盤 (w')	1.00	0.03
基礎地盤強度 ($c', \tan \phi'$)	1.00	0.10

※) 水深変化緩/急：海底勾配 1/30 未満/以上

※) r_{wl} ：既往最高潮位 (H.H.W.L.) とさく望平均満潮位 (H.W.L.) の比

(滑動破壊)

$$Z = f \left\{ \sum_i W_i + P_V - P_B - P_U \right\} - P_H \quad (22)$$

(転倒破壊)

$$Z = \left(a_1 \sum_i W_i + a_2 P_V - a_3 P_B - a_4 P_U \right) - a_5 P_H \quad (23)$$

(支持力破壊)

$$Z = \sum \left\{ \left[c's + (w'+q) \tan \phi' \right] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi'} \right\} - \left\{ \sum (w'+q) \sin \theta + a_5 P_H / r \right\} \quad (24)$$

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)
- P_V : 堤体に作用する鉛直下向き波力 (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(22)~(24)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, 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, 簡易ビショップ法によって性能関数を定義している。

検討ケースは全国広範囲より地域的, 設計条件的に偏りがないように収集された41ケースを用いた。なお, 消波ブロック被覆上部斜面堤の建設事例は数少なく十分な事例数が入手困難であったため, 長尾¹⁸⁾によって収集されたケーソン式混成堤の設計条件をもとに, 検討ケースに追加した。

計算はまず, 現行設計法 (許容滑動安全率1.2, 許容転倒安全率1.2, 許容支持力安全率1.0) による試設計を実施し, 設計された断面について信頼性指標を計算した。試

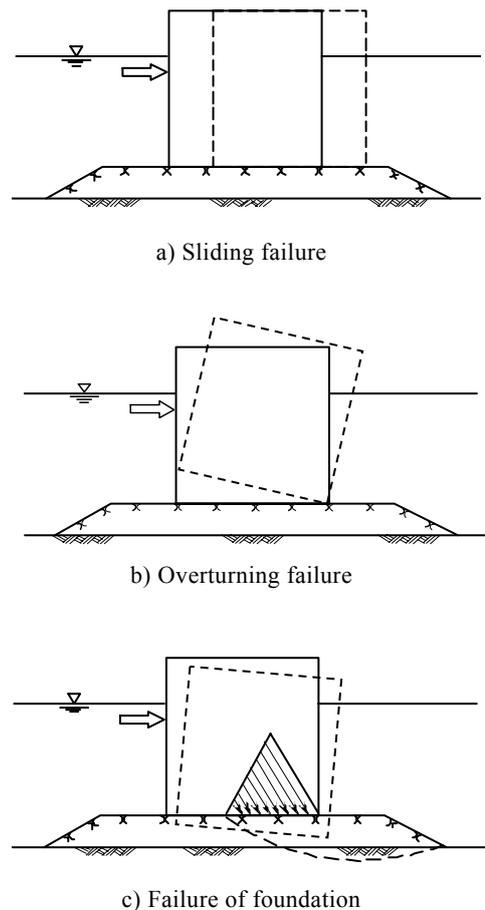


図-7 防波堤の主要破壊モード

設計における特記事項として, 消波ブロック被覆上部斜面堤の傾斜面は静水面より45度とした。

滑動および転倒信頼性指標の計算においては, 波力の水平方向成分および鉛直方向成分 (以下, 揚圧力に鉛直下向き波力を含め, 揚圧力と称す) は同様の確率分布に従うことから完全相関を仮定した。また, 潮位のばらつきの影響は, 波高や波力算定式のばらつきに比較して極めて小さいものと判断されるため¹⁸⁾, 潮位については波力への影響を無視し, 浮力に対してのみ考慮するとともに, 両確率変数間の相関性も無視し, 独立変数として扱った。

支持力信頼性指標の計算においては, 前述のとおり, 簡易ビショップ法によって性能関数が定義される。この方法は分割法による円弧すべり計算法の1つであり, 遠心場における実験等により, 支持力安全性を最も良く説明し得るモデルであることから採用されたものである⁶⁾。この際, 波圧時における安全率の許容値は1.0が標準とされているが, この値はやや安全側の値であり⁶⁾, 仮に安全率が1.0を僅かに下回ったとしても破壊が生じることは無い。このことは, 簡易ビショップ法の性能関数自

体になんらかの安全性の余裕度（不確実性）が内在していることを暗示している。

吉岡ら¹⁸⁾は、この余裕度が簡易ビショップ法での水平波力を作用させる位置にあるものとして捉え、現行設計ではマウンド上面位置に作用させるところを、信頼性指標の計算においては水平波圧の重心位置に作用させている。また、計算は、複数のすべり円弧により算出される最小の信頼性指標を用いることとし、マウンド上面における上載荷重は、鉛直・水平各々の荷重平均値より得られる載荷幅をもとに設定している。さらに、水平波力と上載荷重との相関性についても考慮している。本研究もこれにならう。

地盤強度の自己相関性については、土田ら¹¹⁾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た。水平方向については、深度方向と比較して自己相関性が極めて強く、数10m程度以内の範囲ではほぼ均一と見なしてよい³⁾ことから、同一層と見なした。

4.2 破壊モード別の比較

図-8に現行設計断面における各破壊モードの安全率と信頼性指標の関係を示す。滑動および転倒については良い正の相関が見られるが、支持力についてはばらつきが大きいことがわかる。このことは安全率が構造物の安全性を定量評価する指標ではないことを意味する。支持力について安全率と信頼性指標の関係にばらつきが大きい理由としては、①式(24)に示すように性能関数の非線形性が強いこと、②考慮する上載荷重およびその載荷幅が、現行設計と信頼性解析で異なっていること、③これにより、最小安全率を与える円弧と最小信頼性指標を与える円弧が異なる場合があること、が考えられる。

図-9は、破壊モード間の信頼性指標の相互関係を示したものである。全てのケースにおいて、滑動信頼性指標が支持力信頼性指標および転倒信頼性指標を下回っており、滑動が支配モードであることがわかる。

4.3 破壊モード間の相関性

本節では、破壊モード間の相関性について議論する。

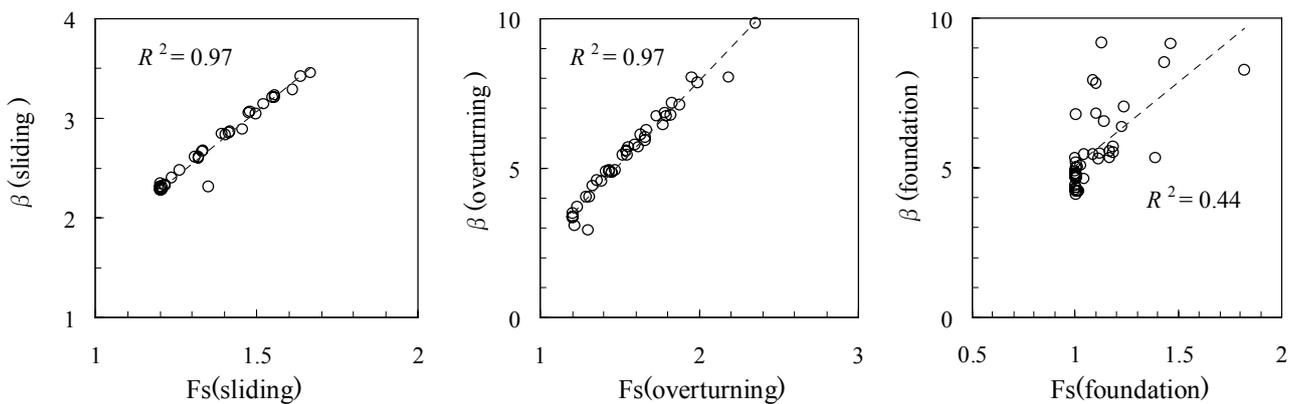


図-8 安全率と信頼性指標の関係

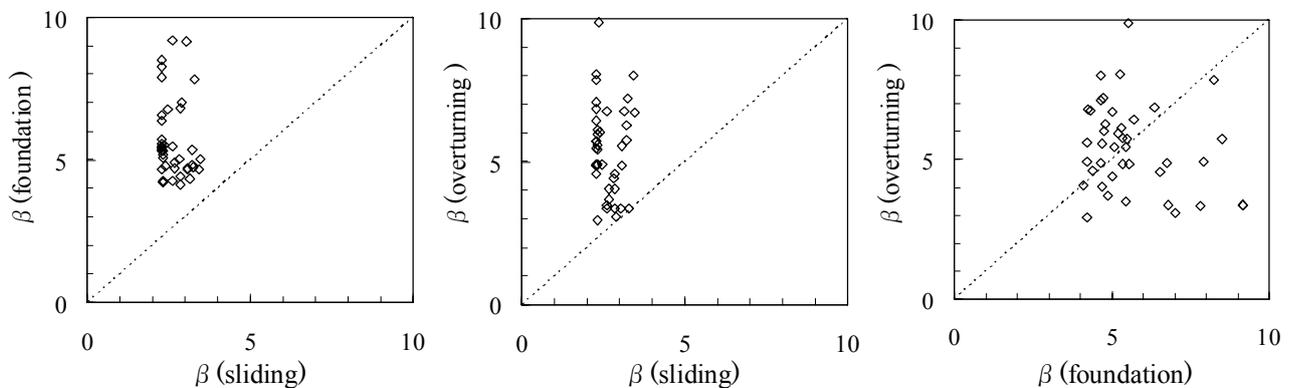


図-9 各破壊モード信頼性指標の相互関係

表-7 各破壊モードの信頼性指標および相関係数（現行設計断面，全事例平均）

破壊モード	消波ブロック被覆上部斜面堤	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 β	<u>2.64</u>	2.18	2.67	2.26	2.41	2.18
転倒 β	<u>5.43</u>	4.20	5.22	3.99	3.17	4.25
支持力 β	<u>5.64</u>	4.43	6.13	4.90	5.91	4.82
ρ （滑動，転倒）	<u>0.56</u>	0.74	0.63	0.68	0.69	0.74
ρ （転倒，支持力）	<u>0.62</u>	0.73	0.61	0.72	0.56	0.68
ρ （支持力，滑動）	<u>0.37</u>	0.56	0.41	0.51	0.42	0.53

破壊モード間の相関係数 ρ_{ij} は，式(25a)によって定義される．ここで，FORMに基づく性能関数 Z の線形化近似関数を代入，変形すると，式(25b)が得られる¹⁰⁾．

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(Z_1, Z_2)}{\sigma_{Z_1} \sigma_{Z_2}} \quad (25a)$$

$$= \sum_X^n \alpha_{X,i} \cdot \alpha_{X,j} \quad (25b)$$

ここに， $\text{cov}(\cdot)$ ：共分散

式(25b)は，各設計因子の感度係数を成分に持つ単位ベクトルの内積を表す．性能関数 Z が，支持力破壊のように非線形性の強い複雑な形式で定義される場合には，式(25a)によって破壊モード間の相関係数を算出することは困難である．しかしながら式(25b)を用いれば，各破壊モードの感度係数さえ解れば算出可能であり，極めて便利である．

表-7に，前節で評価した消波ブロック被覆上部斜面堤の現行設計断面における各破壊モードの信頼性指標と式(25b)によって算出した相関係数の，全事例についての平均値を示す．同表には，比較のため一般的な5形式の値²⁾も併記している．これによると，いずれの相関係数も正の相関を示しており，特に滑動-転倒間，転倒-支持力間の相関が高い値を示しているが，消波ブロック被覆上部斜面堤に関しては，他の5形式と比較して若干小さめの値となっている．これらの相関係数は，波力・揚圧力の感度係数に大きく依存しており，波力・揚圧力の感度係数の絶対値が大きい構造形式，破壊モードほど大きな値を示す¹⁸⁾．消波ブロック被覆上部斜面堤の各破壊モードにおける波力・揚圧力の感度係数は，他の5形式と比較して低く（図-12，13参照），これと同様の傾向を示している．また，各破壊モードの信頼性指標に関しては，滑動信頼性指標が最も小さく，全国平均的に見ても滑動

が支配モードになっている．

4.4 システム信頼性指標

次に各破壊モードの信頼性指標をもとにシステム破壊確率を算出する．システム破壊確率とは，複数の破壊モードを有する構造システム全体の破壊確率である．防波堤の外的安定問題は，滑動，転倒，支持力のいずれのモードで破壊が生じても同程度の被災と判断されるから，これは複数破壊モードの和事象で表される直列システムであると言える．このような構造システムの問題においては，その安全性をシステム破壊確率もしくはシステム信頼性指標によって評価し，制御する必要がある．直列システムにおけるシステム破壊確率の一般式は，次式で定義される．

$$P_f = \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i<j}^m \sum_{i<k}^m P(E_i \cap E_j) + \sum_{i<j<k}^m \sum_{i<k}^m P(E_i \cap E_j \cap E_k) - \dots \quad (26)$$

ここに， P_f ：システム破壊確率， E ：各モードの破壊事象

式(26)の右辺第3項に示すように，システム破壊確率を精度良く算出するためには，高次の同時破壊確率を計算する必要があるが，これを解析的に算出することは困難である．本研究では吉岡ら¹⁸⁾と同様に，次式および図-10に示す2次の範囲の上限値²¹⁾によってシステム破壊確率を評価した．

$$P_f \leq \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j<i} P(E_i \cap E_j) \quad (27)$$

また2次の同時破壊確率は，次式に示すOwenのモデル²⁴⁾によって算出する．

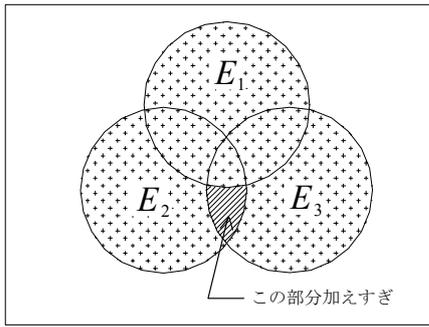


図-10 2次の範囲の上限值

$$P(E_i \cap E_j) = \Phi(-\beta_i) \cdot \Phi(-\beta_j) + \int_0^{\rho_{ij}} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_i^2 - 2t\beta_i\beta_j + \beta_j^2}{1-t^2} \right)\right) dt \quad (28)$$

同モデルは、各破壊モードの信頼性指標および表-7で示したモード間の相関係数を用い、単積分によって精度良く2次の同時確率を算出できるモデルとして良く知られている。

システム破壊確率より、式(15)の逆関数によって算出されるシステム信頼性指標のばらつきを図-11に、システム信頼性指標の比較を表-8に示す。同表には、比較のため一般的な5形式の値¹⁸⁾を併記している。

これによると、消波ブロック被覆形式の防波堤（消波ブロック被覆堤、消波ブロック被覆上部斜面堤）のシステム信頼性指標の平均値が高い値を示している。これは、波力算定式に見込まれている余裕度が他の形式と比較して大きい（表-4参照）ことが要因と考えられる。また、

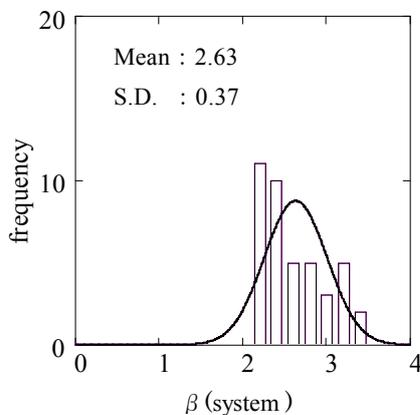


図-11 システム信頼性指標のばらつき

表-8 システム信頼性指標の比較

構造形式	平均値	標準偏差	
消波ブロック被覆上部斜面堤	2.63	0.37	
ケーソン式混成堤	2.38	2.11	0.14
消波ブロック被覆堤		2.64	0.15
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	

システム信頼性指標のバラツキはケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤と比較して大きな値を示している。これは、他の重力式特殊防波堤（上部斜面堤、直立消波ブロック堤、消波ケーソン堤）と同様に、主要な破壊モードである滑動の信頼性指標が広く分散していることが要因と考えられる。

5. コードキャリブレーション

5.1 キャリブレーション方法

本章では、前章（表-8）で定めた現行設計法の平均システム信頼性指標を目標値として、吉岡ら¹⁸⁾と同様の方法により部分係数のキャリブレーションを実施する。ここで、消波ブロック被覆堤上部斜面堤の平均システム信頼性指標は2.63であるが、ここでは、一般的な防波堤形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤の平均システム信頼性指標2.38を目標値とする。これを目標システム破壊確率に換算すると、 8.7×10^{-3} となる。

レベル1信頼性設計法における部分係数 γ_X は、式(19b)を X^* に関する等式に変形することによって、次式によって算出される。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) B_X \quad (29)$$

ここに、 β_T : 目標信頼性指標、 V_X, B_X : それぞれ確率変数 X の変動係数と平均値の偏り（平均値と特性値の比）

式(19b)、(29)より、各設計因子の特性値に部分係数を乗じることによって得られる設計用値を、標準化空間上に描画した点（設計点）は、破壊点に一致することがわかる。各設計因子（確率変数）の変動係数と平均値の偏りは既知であるので、部分係数を決定するには、目標信頼性指標と感度係数を決定すればよい。

(1) 目標信頼性指標