

1. まえがき

土木・建築構造物の設計法についてはこれまで、安全率法や許容応力度法が長年にわたり用いられてきた。しかしながらこれらは、設計手法自体は明瞭であるが、構造物に要求される性能や、設計の結果、達成される性能は明瞭ではない。構造物の安全性に対する社会的説明性・透明性、設計の自由度、国際化という観点からは、構造物の目的、要求性能、性能規定を明確に記す必要がある。したがって、設計手法を規定してきた「仕様規定型」の現行基準に代わり、「性能規定型」の基準に移行するための取組みが、現在、各方面で進められている。また、安全率法や許容応力度法は、照査される限界状態が不明瞭であるとともに、構造物に作用する荷重効果や耐力を確定的に扱うものであるため、構造物の真の安全性を評価するものとは言い難い。これに対し、照査すべき限界状態を明確にした方法が限界状態設計法であり、その照査方法として、限界状態関数（性能関数）に基づく確率論によって安全性の定量評価を行う方法が信頼性設計法である。信頼性設計法は、土木および建築構造物に関する国際規格であるISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）の中で明確に位置づけられており、WTOに加盟しているわが国としては、国際規格に対する整合性が求められる。

信頼性設計法の適用により、安全性を正しく定量評価するためには、設計に介在する様々な不確定要因の確率分布を適切に定める必要がある。さらに、信頼性設計法においては、安全性の定量評価に加え、その許容値をどの程度にするかという目標安全性水準の設定が必要となる。その際の最も有力な方法のひとつは、現行設計法が担保する安全性を統計的に定め、その平均値をもって目標安全性水準とする方法である。

信頼性設計法の中でも、最も平易なレベル1信頼性設計法（部分係数法、以下、レベル1設計法と略記）は、汎用性、利便性の観点から今後の標準的な設計法としてその導入が期待されている（国土交通省、2002）。部分係数は、後述するように、各設計因子の推定精度、感度係数および目標信頼性指標をもとに算出される。ただし、わずかな設計事例のみによってこれを決定したのでは、条件に偏りが生じてしまうため、レベル1設計法の合理性は発揮されない可能性がある。したがって、合理的なレベル1設計法を構築するためには、多数の建設事例に基づく信頼性評価によって、部分係数のキャリブレーションを実施する必要がある。この際、レベル1設計法の目標安全性水準を前述した現行設計法の平均安全性水準

とする方法が一般的であり、これが、いわゆるコードキャリブレーションである。

ここで重力式防波堤の外的安定問題に着目すると、一般的な構造形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤については、設計因子の従う確率分布を統計的に定め、これを基にした現行設計法の安全性評価が実施されている（長尾、2001、2002）。この際、防波堤の安全性に大きな影響を及ぼす波力算定式の推定精度については、合田波力公式による計算値と水理模型実験結果との比較結果（Takayama・Ikeda、1993）を用いている。しかしながら、近年、防波堤の沖合化、大水深化に伴い、その耐波性能を高めた上部斜面堤や、浅水域での消波性能を高めた直立消波ブロック堤、両性能を高めた消波ケーソン堤が開発され、実用化に至っている（以下、重力式特殊防波堤と称す）。これら重力式特殊防波堤についてはそれぞれ異なる波力算定式が用いられていることから、その推定精度も異なる可能性がある。このことは、現行設計法が担保する安全性水準も異なることを意味している。また、長尾（2001、2002）は、コードキャリブレーションを実施し部分係数の提案値を示しているが、レベル1設計法が担保する安全性のばらつきが若干大きく、今後、より合理的な設計となるように部分係数を改善する必要があった。

そこで本研究では、5形式の重力式防波堤を対象とし、その外的安定問題（滑動、転倒、支持力）に関する現行設計法の安全性評価および部分係数のコードキャリブレーションを実施する。

なお、一般的な防波堤の設置目的は、水域施設の静穏度を維持し、荷役の円滑化、船舶の航行・停泊および港内施設の保全を図ることである。そして、その耐波安定性に関してはこれまで、設計供用期間を50年とし、これと等しい再現期間の波作用すなわち50年確率波に対する安定性照査が多く実施されてきた。したがって本研究においても、同様の安全性評価を実施する。また通常の防波堤の場合、地震時の影響は高波浪時の影響に比べて無視し得ることが多いため、本研究ではこれを考慮しない。なお、防波堤の耐震性能に関する研究には、長尾・尾崎（2004）、尾崎・長尾（2004）がある。

以下、2. では、信頼性設計法の概要について述べる。特に、一次信頼性理論に基づく信頼性指標と感度係数について詳述する。3. では、既往の実験事例を収集し、重力式特殊防波堤に対する波力算定式の推定精度を評価した結果について述べる。4. では、前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詳細な検討を実施する。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し、レベル1信頼性設計法を構築した結果を示す。

2. 信頼性設計法の概要

2.1 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-1)。

表-1 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 |

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、その結合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・鈴木, 2003)が、この方法も広義にはレベル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-1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(星谷・石井, 1986)。

$$\beta = \frac{u_Z}{\sigma_Z} \quad (1)$$

ここに、 Z : 性能関数, μ : 平均値, σ : 標準偏差

式(1)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

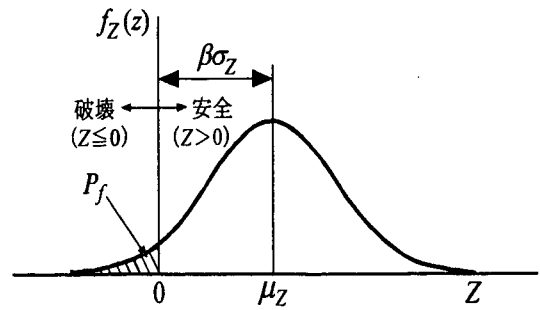


図-1 信頼性指標

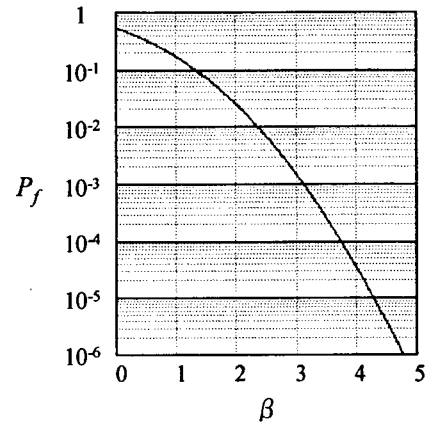


図-2 破壊確率と信頼性指標の関係

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-2となる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (2)$$

ここに、 Φ : 標準正規確率分布関数

すなわち、信頼性指標 β と破壊確率 P_f は逆の関係にあり、信頼性指標が大きいほど破壊確率は小さくなる。

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。

2.2 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。

$$X'_i = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (3)$$

以下では、 X'_i によって表される空間を標準化空間と呼ぶ。性能関数が $Z = g(R, S)$ (R : 耐力, S : 荷重効果)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-3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 の等結合確率密度線である。破壊領域 ($Z < 0$) における結合確率が破壊確率 P_f であり、標準化空間では次式によって定義される。

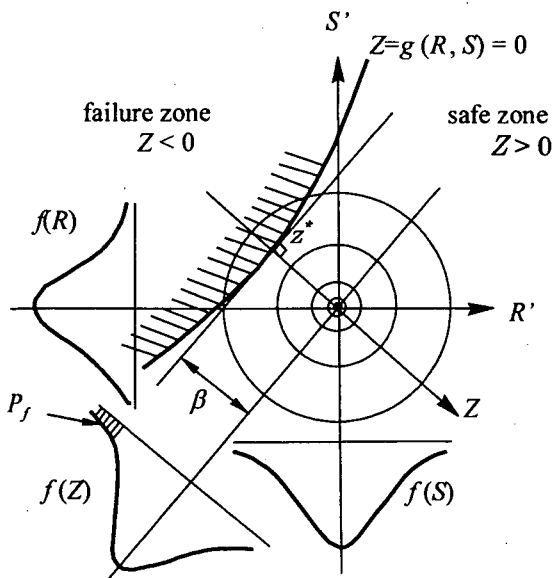


図-3 2変数の場合の標準化空間

$$P_f = \iint_{Z \leq 0} \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(R'^2 + S'^2)\right) dR' dS' \quad (4)$$

Z が非線形である場合には、式(4)を解析的に解くことは困難であるため、 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(2)が導かれる。したがって、信頼性指標 β は式(2)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Cornell (1969)タイプと、破壊点周りの線形化近似に基づくHasofer-Lind (1974)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次式によって定義される (星谷・石井, 1986)。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (u_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (5)$$

ここに、 X^* : 確率変数 X の破壊点における値

式(5)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。

$$\alpha_{X_i} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (6a)$$

$$= - \left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \right) / \beta \quad (6b)$$

式 (6b) 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

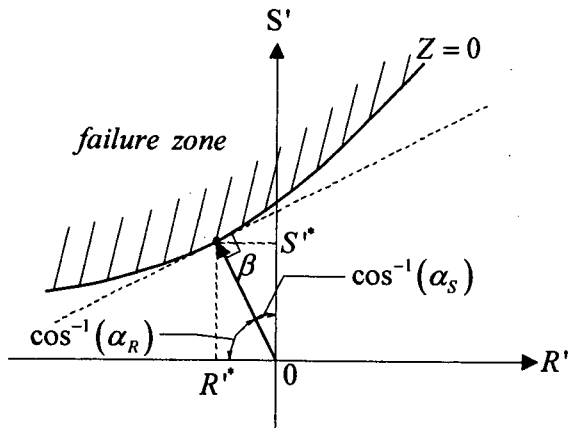


図-4 感度係数

よって定義される場合には、図-4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、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-4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(7)、(8)で表される (長, 1995)。

$$\sigma'_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (7)$$

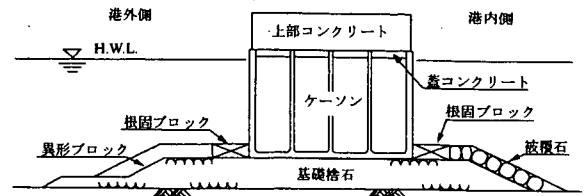
$$\alpha'_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \right) \rho_{X_i, X_j} \sigma_{X_j} / \sigma'_z \quad (8)$$

3. 波力算定式の推定精度

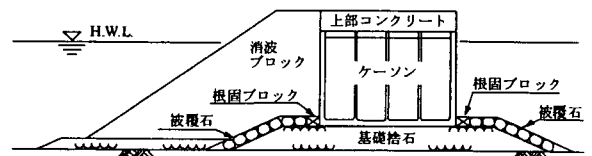
3.1 重力式防波堤の波力算定式

本研究で扱う重力式防波堤は、一般的なケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤と重力式特殊防波堤（上部斜面堤，直立消波ブロック堤，消波ケーソン堤）の5形式である。図-5にその断面を示す。

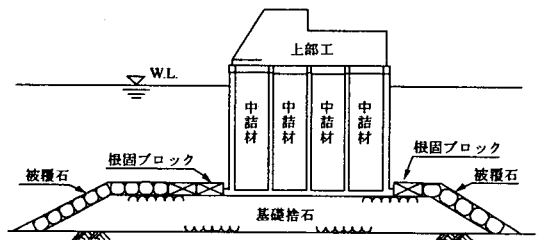
上部斜面堤は、静水面上の上部工に約45度の傾斜面を設け、波力の一部を斜面で受けることによって水平波力を低減すると同時に、鉛直下向き波力として利用することによって耐波安定性の向上を図った混成防波堤であり、



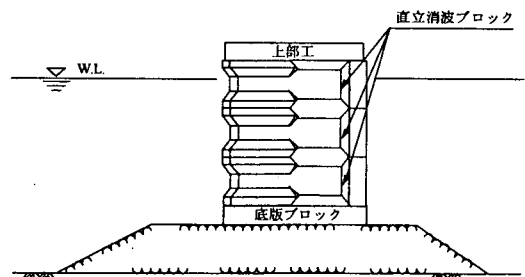
a) ケーソン式混成堤



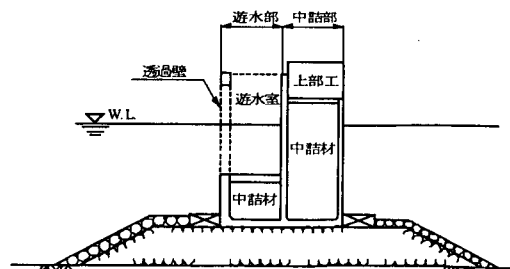
b) 消波ブロック被覆堤



c) 上部斜面堤



d) 直立消波ブロック堤



e) 消波ケーソン堤

図-5 重力式防波堤断面

波浪条件の厳しい海域や大水深域に適している。このため直立壁堤に比べて経済的な断面となる反面、越波伝達波が増加するという欠点もある。また、近年は、さらなる耐波性能の向上を目的とした半没水型も開発されている。

直立消波ブロック堤は、消波機構を有する特殊なブロックを直積みとしたブロック式混成堤であり、波浪の流れとして受け入れる透過部と、波浪のエネルギー消散を促す遊水部の効果によって、反射波および越波伝達波低減を図った防波堤である。消波ブロックには、クロスホロー、ワーロック、イグルー、アングロック等、様々な形状のものが開発されている。また、耐波安定性に限界があるため、一般に内湾等、波浪条件の比較的穏やかな海域に設置される。

消波ケーソン堤は、スリットケーソン堤とも呼ばれ、港外側に設けた透過壁と遊水室からなる混成防波堤である。透過壁の形状には、一般的な縦スリットのほかに、横スリット、多孔壁などもある。直立消波ブロック堤と同様な消波性能に加え、鉛直下向き波力の効果によって耐波性能も向上することから、近年は波浪条件の厳しい海域や大水深域にも適用されている。

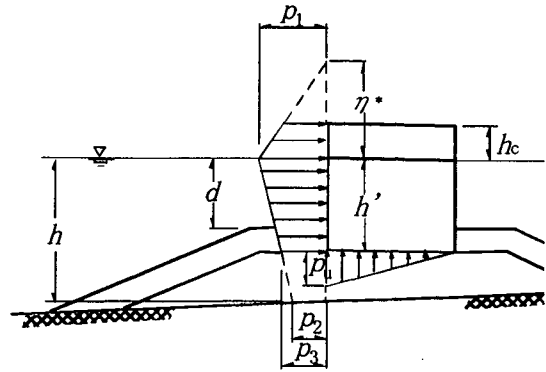
各種重力式防波堤に作用する波圧分布の模式図を図-6に示すとともに、それぞれに用いられる波力公式について概説する。

a) ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤

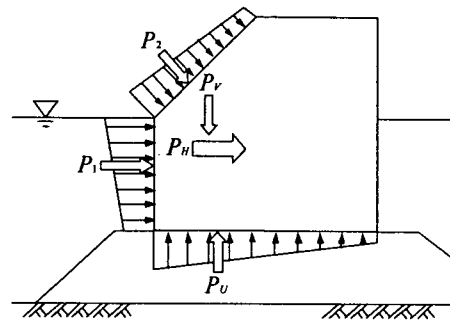
現行の「港湾の施設の技術上の基準（運輸省港湾局監修、1999）」において、合田式（合田、1973）を用いることが標準とされている。合田式の特徴としては、重複波から碎波に至る波力を周期の影響を含めて連続的に算定できること、波力の計算には有義波高ではなく最高波高が用いられること等が挙げられる。また、合田式は条件の異なる壁にも準用できるように波圧の補正係数 λ （水平波圧の重複波圧成分に対する λ_1 、碎波圧成分に対する λ_2 、揚圧力に対する λ_3 ）を含む式となっている。ケーソン式混成堤では、補正係数 λ は全て1.0が用いられる。また、急勾配海底面上や高マウンドの直立壁にあっては衝撃碎波力が考慮される（高橋ら、1992）。消波ブロック被覆堤については、消波ブロックによる碎波圧低減により λ_2 は0としてよく、 λ_1 および λ_3 については、波高水深比 H/h の関数として計算される（高橋ら、1990）。

b) 上部斜面堤

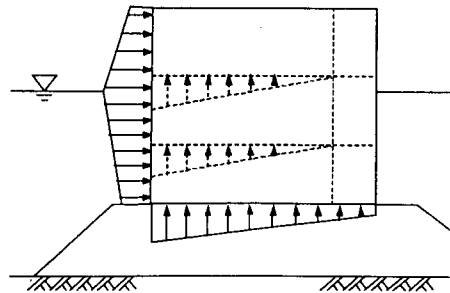
まず、合田式によって、上部斜面堤の直立壁に作用する波力 P_1 と、斜面壁を直立面に投影した面積に作用する波力 P_2 を算出する。次に、波力 P_2 は斜面平行成分と斜面直交成分に分解され、そのうちの斜面直交成分のみが堤



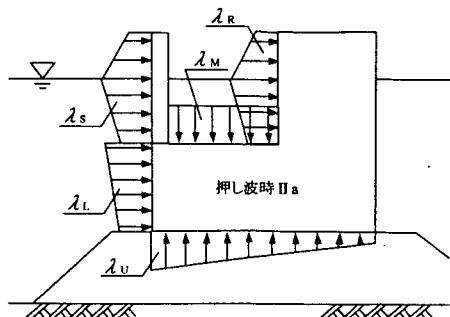
a) ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤



b) 上部斜面堤



c) 直立消波ブロック堤



d) 消波ケーソン堤

図-6 設計計算に用いる波圧分布

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(森平・国田, 1979)。以上によって求めた波力は、水理模型実験結果に比べてやや過大な評価となることから、細山田ら(1994)は、 P_1 、 P_2 のそれぞれに対する波力低減係数 λ_v 、 λ_{SL} を提案し、これに乗ずることによって上部斜面堤に作用する波力を算出することを提案した。また、消波ブロック被覆上部斜面堤に対する波力低減係数も提案されているが(佐藤ら, 1992)、本研究では対象外とする。

c) 直立消波ブロック堤

合田式を準用した簡便な方法により算出する。すなわち、合田式において波圧の補正係数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 を適切に評価することによって波力を計算する。通常は、消波ブロックによる砕波エネルギー分散効果を期待して $\lambda_2=0$ とし、 $\lambda_1=\lambda_3=1.0$ として設計される場合が多い。

d) 消波ケーソン堤

高橋ら(1991)は、遊水室に上床版がない場合の縦スリットケーソンを対象に波力算定式を提案した。これは、ケーソン全体および各部材に作用する波力の特性と位相差の影響、マウンドの影響による波力の増大を考慮したものであり、波力の位相として、押し波時3ケース、引き波時3ケースの計6ケースを考え、各位相時に作用する波力を、合田式を準用した波圧の補正係数 λ によって算出する方法である。この方法により、堤体の外的安定に対して最も厳しい波力のみならず、各壁面の部材設計に対しても最も厳しい波力を与えることが可能となる。また、本方法は横スリットケーソン等、各種の消波ケーソンに対しても適用可能であることが示されている。このほか、直立消波ブロック堤と同様の簡便法や遊水室に上床版がある場合の衝撃圧の算定法(高橋・谷本, 1984)があるが、本研究では対象外とする。

3.2 推定精度の評価

ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の波力算定式推定精度についてはTakayama・Ikeda(1993)による評価結果があるため、本節では、重力式特殊防波堤の波力算定式推定精度を評価する。評価方法は、竹中ら(1999)のように現地観測に基づく方法も考えられるが、本研究では、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 と上記の波力算定式による計算値 P_C との比によって、これを評価した。

上部斜面堤については、森平・国田(1979)より26データ、中田ら(1983)より5データ、大堀ら(1986)より13データ、細山田ら(1994)より4データを収集し、計48

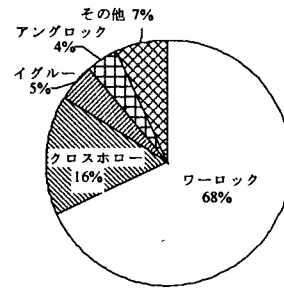


図-7 各種直立消波ブロックの国内占有率

データによって評価した。ここで、森平・国田(1979)の波力実験結果は、堤体の滑動限界重量に基づく逆算値であるため、摩擦係数のばらつきの影響が含まれているものと考えられる。このため、長尾(2001, 2002)が用いた摩擦係数の確率分布(次章表-3参照)をもとにその影響を除去して算出した。

直立消波ブロック堤については、運輸省第二港湾建設局が行った水理模型実験結果より24データ、同じく東洋建設(株)が行った水理模型実験結果より16データを収集し、計40データによって評価した。ここで、直立消波ブロック堤の波力算定精度は、ブロック形状によって傾向が異なるため、柳生・湯坐(1980)より各種ブロックの国内占有率を調べ(図-7)、これによりデータ数を重み付けして算出した。

消波ケーソン堤については、高橋ら(1991)によってマウンドなし、高マウンド、低マウンドの各ケース27データに基づく詳細な検討がなされ、ケース毎の評価精度が示されていることから、これらの計81データによって評価した。

図-8に、波力算定式推定精度の評価結果を示す。これによると、直立消波ブロック堤に関してやや分布形のばらつきが見られるものの、概ね正規分布として近似できるとわかる。表-2は、本研究による評価結果と

表-2 波力算定式推定精度の比較

| 構造形式 | B^{*1} | V^{*2} |
|-------------------------|----------|----------|
| 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 | 0.96 | 0.18 |
| 直立消波ブロック堤 | 0.97 | 0.18 |
| 消波ケーソン堤 | 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・Ikeda(1993)

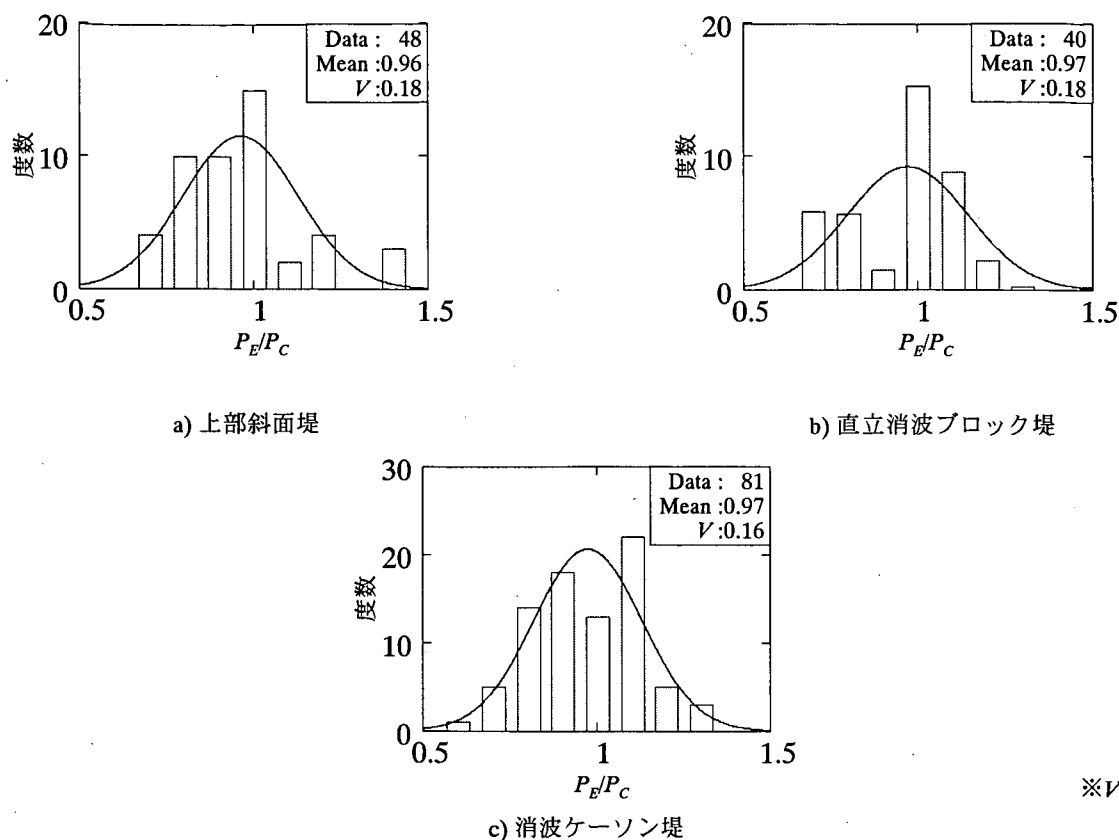


図-8 波力算定式推定精度

※V: 変動係数

Takayama・Ikeda (1993) によるケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤に対する評価結果を比較したものである。これを見ると、変動係数はケーソン式混成堤と同程度であり、消波ブロック被覆堤に比べてやや大きい。各種波力公式による波力推定時のばらつき程度には、碎波圧や衝撃碎波圧の推定精度が大きく寄与するものと考えられる。したがって、これらの影響をほとんど受けない消波ブロック被覆堤のみ、波力算定式推定精度の変動係数が小さいものと考えられる。また、平均値の偏りは1に近く、近年開発された重力式特殊防波堤の波力算定精度には安全性の余裕度が見込まれていないことがわかる。

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、今回評価した波力算定式推定精度(表-2)および長尾(2001, 2002)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-3)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-9に示し

表-3 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 |
| 碎波変形推定精度 | 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

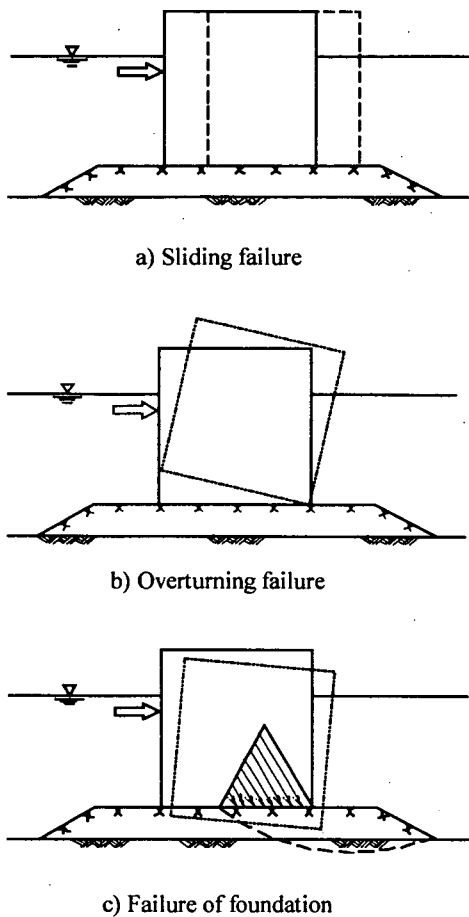


図-9 防波堤の主要破壊モード

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（運輸省港湾局監修，1999）」に従い、式(9)~(11)によって定義する。

(滑動破壊)

$$Z = f \left\{ \sum_i W_i - P_B - P_U \right\} - P_H \quad (9)$$

(転倒破壊)

$$Z = \left(a_1 \sum_i W_i - a_2 P_B - a_3 P_U \right) - a_4 P_H \quad (10)$$

(支持力破壊)

$$Z = \sum \left\{ \left[c' s + (w' + q) \tan \phi' \right] \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \tan \phi'} \right\} - \left\{ \sum (w' + q) \sin \theta + a_3 P_H / r \right\} \quad (11)$$

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)
- $a_1 \sim a_5$: 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(9)~(11)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。ここで、滑動破壊については、これとは別に下迫・高橋（1998）が提案する滑動量に基づく信頼性設計法があるし、支持力破壊についても簡易ビショップ法が実現現象の破壊メカニズムと調和的であるかどうかの議論があろう。しかしながら、本研究の目的はあくまでも安全率に代わる新たな部分係数の提案であり、性能関数そのものの精査ではない。このため、現行設計法の考え方をそのまま継承して性能関数を定義した。

検討ケースには、長尾（2001，2002）によって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76の建設事例（ケーソン式混成堤38ケース、消波ブロック被覆堤38ケース）を用いた。検討対象施設の分布を図-10に示す。また、重力式特殊防波堤については、上部斜面堤38ケース、直立消波ブロック堤40ケース、消波ケーソン堤39ケースを収集した。ここで、上部斜面堤および消波ケーソン堤については十分な事例数が入手困難であったため、長尾（2001，2002）が用い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、各ケースについて現行設計法（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。試設計における特記事項として、上部斜面堤の傾斜面は静水面より45度とした。直立消波ブロック堤は、柳生・湯坐（1980）に基づく統計解析により空隙率40%、重心位置を断面中心とし、また、直立部の

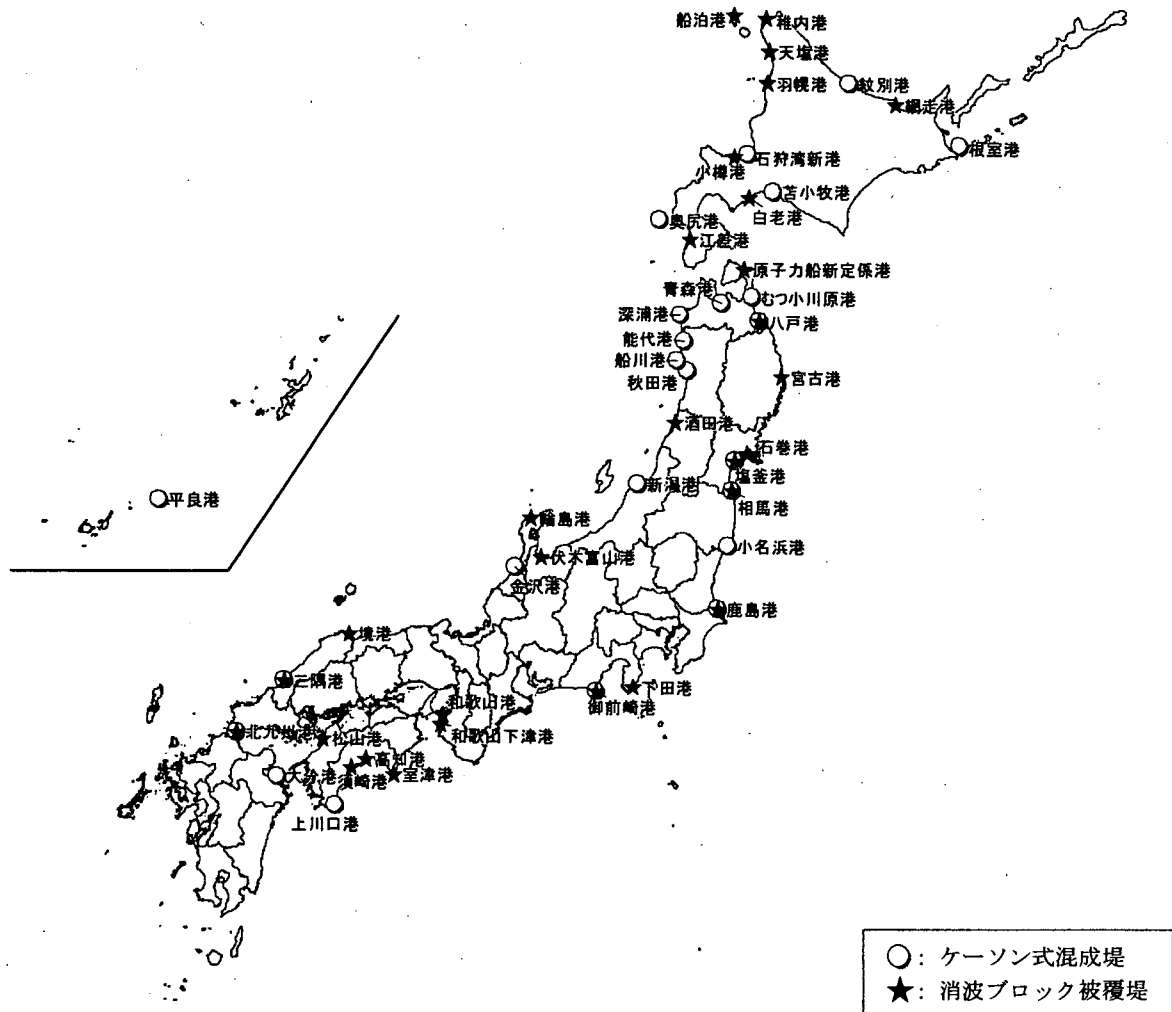


図-10 検討対象施設の分布 (ケーソン式混成堤, 消波ブロック被覆堤)

堤体は全て無筋コンクリートと見なした。消波ケーソン堤は全て縦スリット型とし、遊水部の断面諸元は谷本・吉本(1982)を参照し、十分な消波効果が得られるように決定した。波力の位相は、外的安定上問題となる押し波時3ケースのみを対象とし、水平波圧合力が最大となる位相を採用した。

滑動および転倒信頼性指標の計算においては、波力および鉛直波圧合力(以下、鉛直下向き波圧成分を含め、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、浮力の他に波力に対しても寄与する可能性がある。そこで、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤について、潮位と波高を確率変数としたモンテカルロシミュレーションを実施し、水平波力のばらつきに占める潮位のばらつきの影響度を調べた。得られた結果を図-11に示す。図は、潮位のばらつきの影響を考慮した場合の水平波力の

標準偏差 σ_{ph} と、これを無視した場合の標準偏差 σ_{ph}' の比を評価したものである。図には、水平波力 P_h と潮位 wl との相関係数も併記している。図より、水平波力の標準偏差に占める潮位の影響は、最大でも1%程度であることがわかる。また、消波ブロック被覆堤における水平波力と潮位の相関係数は極めて小さく独立と見なし得るが、ケーソン式混成堤については弱い負の相関性が見受けられる。これは、ケーソン式混成堤については衝撃砕波力が作用し、潮位が低いほど水平波力が大きくなる傾向を示していると考えられる。以上のことから、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。したがって本研究では、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、

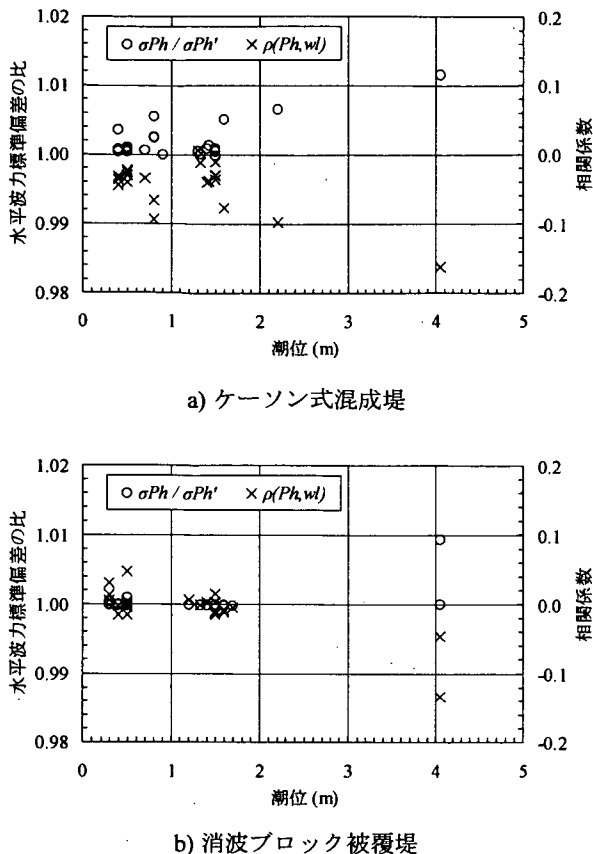


図-11 水平波力のばらつきに占める潮位のばらつきの影響

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(小林ら, 1987)。この際、波圧時における支持力安全率の許容値は1.0が標準とされている。このことは、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く、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。そこで本研究では、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ることとした。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た。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。地盤強度の自己相関性については、土田・湯(1996)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(奥村・土田, 1981)ことから、同一層と見なした。

4.2 破壊モード別の比較

図-12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概ね正の相関にあるが、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相関にばらつきが大きい理由としては、①式(11)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。

ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤と重力式特殊防波堤を比較すると、傾向は一致しているものの、相違点として、重力式特殊防波堤については滑動安全率や滑動信頼性指標が広く分散していることが挙げられる。これは重力式特殊防波堤の場合、現行設計において滑動が支配的とならないケースがあることを表している。この理由として、重力式特殊防波堤は鉛直下向き波力や消波性能によって滑動安全性を高めたことにより、通常のケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に比べて堤体幅を縮減できるため、相対的に転倒安全性が低下したものと考えられる。また、重力式特殊防波堤について構造形式別に比較すると、直立消波ブロック堤の転倒信頼性指標が全体的に低いことが挙げられる。これは、直立消波ブロック堤のみ鉛直下向き波力が作用せず、抵抗モーメントとして寄与しないためと考えられる。

また、重力式特殊防波堤の転倒破壊に着目すると、安全率が増加するにつれて信頼性指標の増加幅が減少し、上に凸の分布形が見受けられる。特に、直立消波ブロック堤の転倒破壊に関してその傾向が顕著である。この点について、性能関数が $Z=R-S$ によって定義される場合をもとに考察する。今、耐力 R および荷重効果 S の平均値、変動係数をそれぞれ、 μ_R, μ_S, V_R, V_S とし、平均値の偏りは1とする。このとき、安全率 $F_S = \mu_R / \mu_S$ を式(5)に代入、変形すると次式が得られる。

$$\beta = \frac{F_S - 1}{\sqrt{F_S^2 V_R^2 + V_S^2}} \quad (12)$$

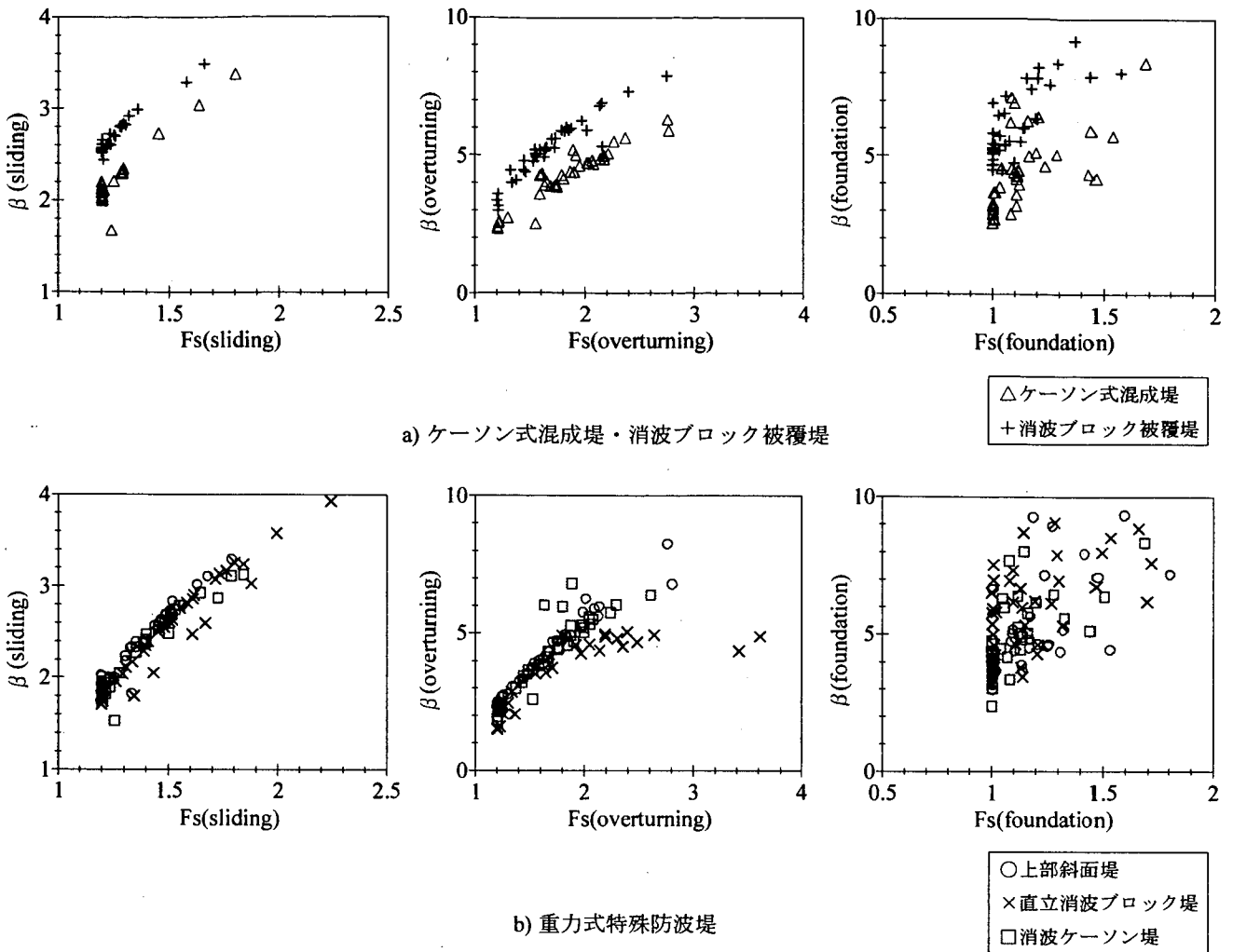


図-12 安全率と信頼性指標の関係

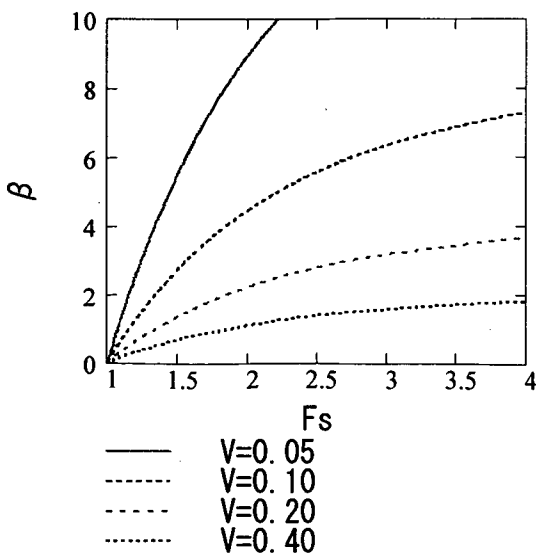


図-13 安全率と信頼性指標の関係 (Z=R-Sの場合)

式(12)からも、安全率と信頼性指標は非線形の関係にあり、安全率が安全性の定量指標になり得ないことがわかる。図-13は、 $V=V_R=V_S$ とし、 V を変化させた場合の安全率と信頼性指標の関係を表したものである。図から、安全率が増加するにつれて信頼性指標の増加幅が減少し、上に凸の曲線になっているとともに、その傾向は変動係数に依存して大きく変化することがわかる。また、図は $V_R=V_S$ とした場合であるが、両者の大小によってもその傾向は当然変化する。直立消波ブロック堤の転倒破壊については、このような安全率と信頼性指標の非線形性が強く現われたものと考えられる。

図-14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。いずれの構造形式においても、全てのケースで滑動信頼性指標が支持力信頼性指標を下回っている。滑動信頼性指標と転倒信頼性指標の関係においても、滑動信頼性指標が下回っているケースが多く、このことから滑動が支配モードであることがわかる。ただし、

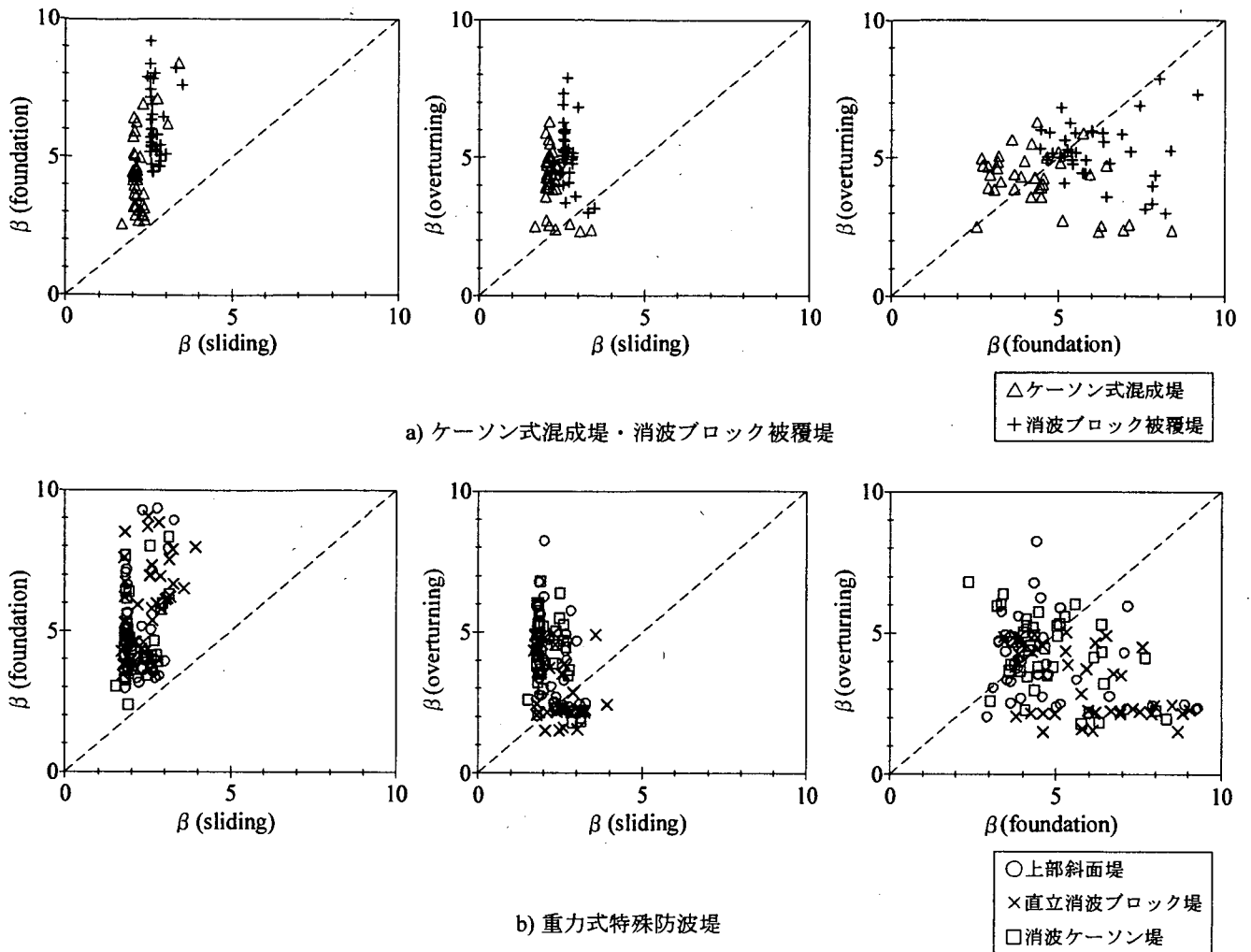


図-14 各破壊モード信頼性指標の相互関係

転倒が支配モードとなるケース数は構造形式によって異なっており、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤では76ケース中5ケースのみであるのに対し、上部斜面堤および消波ケーソン堤は6ケース、直立消波ブロック堤に至っては18ケースとなっている。この理由は上述した通り、一般的なケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に比べ、重力式特殊防波堤の耐波性能や消波性能が異なっていることに起因している。

以上のことから、重力式防波堤は滑動安全性が最も低く支配モードであるが、重力式特殊防波堤については転倒安全性も若干低いと言える。

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。破壊モード間の相関係数 ρ_{ij} は、式(13a)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(13b)が得られる(長, 1995)。

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(Z_1, Z_2)}{\sigma_{Z_1} \sigma_{Z_2}} \quad (13a)$$

$$= \sum_X^n \alpha_{X,i} \cdot \alpha_{X,j} \quad (13b)$$

ここに、 $\text{COV}(\cdot)$: 共分散

式(13b)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(13a)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(13b)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-4に、前項で評価した現行設計断面における各破壊

表-4 各破壊モード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 | 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 | 2.18 | 2.67 | 2.26 | 2.41 | 2.18 |
| 転倒 β | 4.20 | 5.22 | 3.99 | 3.17 | 4.25 |
| 支持力 β | 4.43 | 6.13 | 4.90 | 5.91 | 4.82 |
| ρ （滑動，転倒） | 0.74 | 0.63 | 0.68 | 0.69 | 0.74 |
| ρ （転倒，支持力） | 0.73 | 0.61 | 0.72 | 0.56 | 0.68 |
| ρ （支持力，滑動） | 0.56 | 0.41 | 0.51 | 0.42 | 0.53 |

モードの信頼性指標と式(13b)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。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。また、消波ブロック被覆堤よりもケーソン式混成堤の方が相関は高い。これらは波力・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、破壊モードほど相関が高くなっている（次章で詳述）。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。

以上に述べた、現行設計断面においては滑動破壊が支配モードであること、破壊モード間には高い正の相関があることから判断する限り、滑動を伴わない転倒破壊や支持力破壊は極めて少ないものと考えられる。河合ら（1997）が実施した滑動および転倒被災の事例調査によれば、過去5年間に於いて被災した32函のうち、31函が滑動破壊であり、転倒のみによって被災した事例は1つもない。また、小林ら（1987）によれば、収集した被災事例19例のうち、支持力不足が原因で被災した事例はわずか1例のみであり、4例が支持力破壊に至る前に転倒している。今回の算出結果は、これら過去の被災事例ともよく整合するものと考えられる。

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

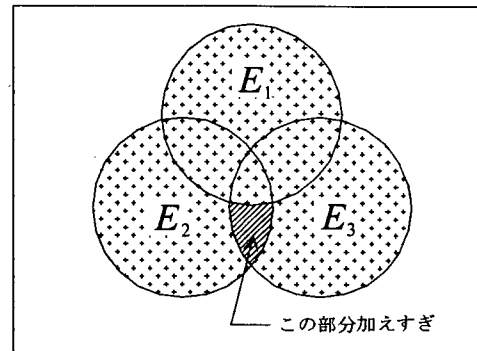


図-15 2次の範囲の上限値（Ditlevsen, 1979）

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。

$$P_f = \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i < j} \sum P(E_i \cap E_j) + \sum_{i < j < k} \sum \sum P(E_i \cap E_j \cap E_k) - \dots \quad (14)$$

ここに、 P_f : システム破壊確率、 E : 各モードの破壊事象
式(14)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、高次の結合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。したがって、本研究では、次式および図-15に示す2次の範囲の上限値（Ditlevsen, 1979）によってシステム破壊確率を評価した。

$$P_f \leq \sum_{i=1}^m P(E_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} P(E_i \cap E_j) \quad (15)$$

本研究で対象とする重力式防波堤の場合、転倒および支持力信頼性指標は概して高く（図-14参照）、さらに

各破壊モード間の正の相関係数も大きい(表-4 参照)ため、2次の結合破壊確率のうち、3次の結合破壊確率に含まれない領域(図-15の斜線部)は極めて小さいものと判断される。このことから、これを無視した式(15)によっても十分な精度が得られるものと考えられる。また2次の結合破壊確率は、次式に示すOwen(1956)のモデルによって算出する。

$$P(E_i \cap E_j) = \Phi(-\beta_i) \cdot \Phi(-\beta_j) + \int_b^{c_j} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta_i^2 - 2t\beta_i\beta_j + \beta_j^2}{1-t^2}\right)\right) dt \quad (16)$$

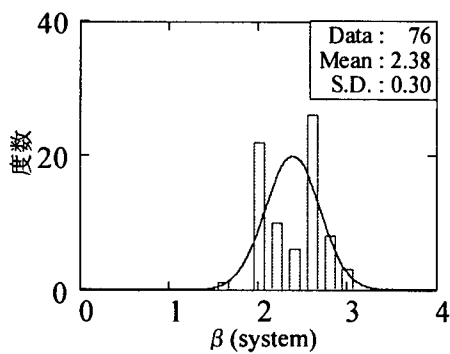
同モデルは、各破壊モードの信頼性指標および前項で示したモード間の相関係数を用い、単積分によって精度良く2次の結合確率を算出できるモデルとして良く知られている。

システム破壊確率より、式(2)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-16に、システム信頼性指標の比較を表-5に示す。まずケーソン式

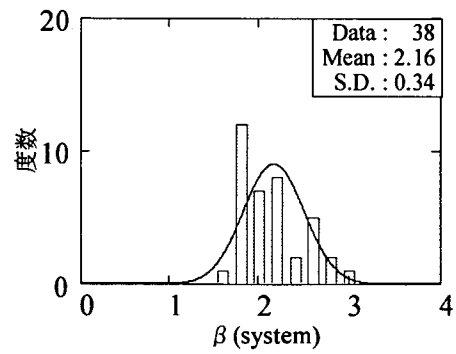
混成堤および消波ブロック被覆堤について見ると、消波ブロック被覆堤の方がシステム信頼性指標の平均値が高い。河合ら(1997)による被災事例調査によれば、消波ブロック被覆堤の被災遭遇確率は、ケーソン式混成堤と比較して1オーダー低い値であるとの報告がなされており、本解析結果はこれと調和的である。また、重力式特殊防波堤については、いずれの構造形式もケーソン式混成堤や消波ブロック被覆堤に比べてシステム信頼性指標のばらつきが大きい。これは、図-12および図-14に示したように、滑動信頼性指標が広く分散していることや、これによって転倒安全性が低下しているためである。さらにシステム信頼性指標の平均値に着目すると、いずれの構造形式も消波ブロック被覆堤に比べて若干低い。こ

表-5 システム信頼性指標の比較

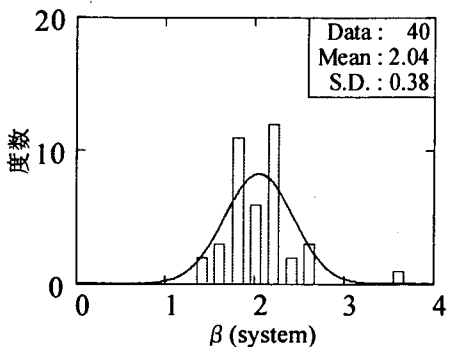
| 構造形式 | 平均値 | 標準偏差 |
|-----------|------|------|
| ケーソン式混成堤 | 2.38 | 2.11 |
| 消波ブロック被覆堤 | | 2.64 |
| 上部斜面堤 | 2.16 | 0.34 |
| 直立消波ブロック堤 | 2.04 | 0.38 |
| 消波ケーソン堤 | 2.05 | 0.32 |



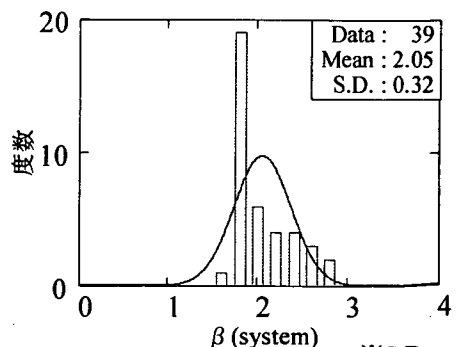
a) ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤



b) 上部斜面堤



c) 直立消波ブロック堤



d) 消波ケーソン堤

※S.D.: 標準偏差

図-16 システム信頼性指標のばらつき

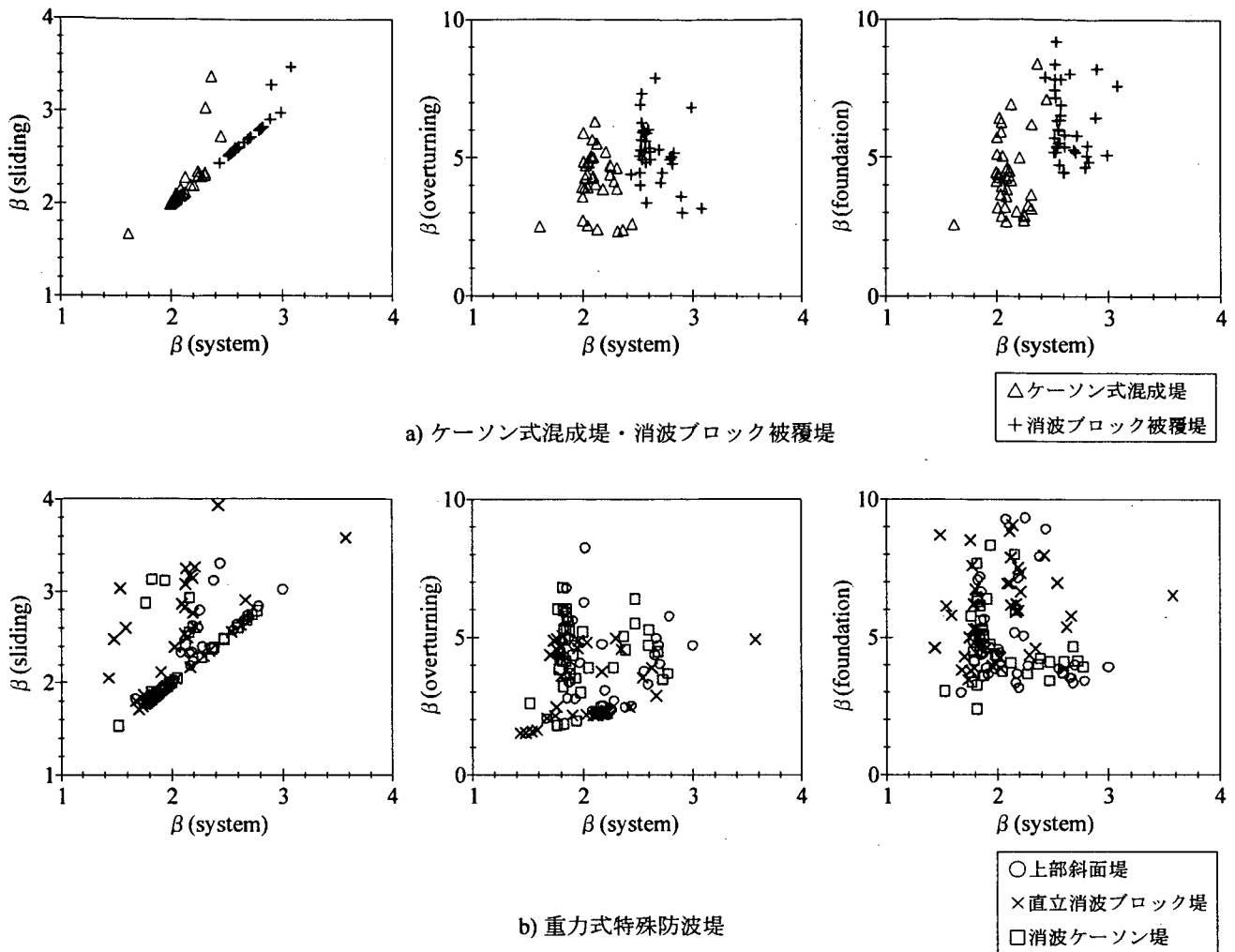


図-17 システム信頼性指標と各破壊モード信頼性指標の相関

の主要因は、表-2 に示した波力算定式に見込まれる安全性の余裕度の違いによるものである。

図-17 は、システム信頼性指標と各破壊モードの信頼性指標との相関を示したものである。滑動が支配モードであるケースが多いことから、システム信頼性指標との相関は強い。ただし、直立消波ブロック堤については転倒が支配モードとなるケースが多いため、転倒信頼性指標との相関も見受けられる。

以上のことから、現行設計法が担保する安全性水準は、設計条件によって大きく変化するとともに、その平均水準は構造形式によって異なっていることがわかった。

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-5)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、部分係数のキャリブレーションを実施する。ここで、ケーン式混成堤、消波ブロック被覆堤については、それぞれの平均信頼性指標が異なっているが、これは明瞭な意図のもとに設計された結果ではないと考えられるため、ここでは両者の平均値(2.38)を目標値とした。また、重力式特殊防波堤については、ケーン式混成堤、消波ブロック被覆堤の目標値に合わせる方法も考えられるが、建設コストに与える影響を考慮し、ここでは各構造形式の平均値を目標値とした。以上、本研究で用いる目標システム信頼性指標を、式(2)によって目標システム破壊確率に換算すると、それぞれ、ケーン式混成堤、消波ブロック被覆堤が 8.7×10^{-3} 、上部斜面堤が 1.5×10^{-2} 、直立消波ブロック堤が 2.1×10^{-2} 、消波ケーン堤が 2.0×10^{-2} 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(6b)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。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) B_X \quad (17)$$

ここで、 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(6b), (17)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。

合理的なレベル1設計法を構築するための部分係数のキャリブレーションには、いくつかの方法が考えられる。部分係数の組合せを仮定し、得られた結果と目標破壊確率もしくは目標信頼性指標との分散が最小となる部分係数を最適とする方法 (例えば、白木ら, 2003) や、既設構造物における信頼性解析によって感度係数を評価する方法 (例えば、鈴木ら, 2002) 等があげられる。長尾 (2001, 2002) が実施した防波堤のコードキャリブレーションは、式(17)に用いる α として、感度係数の代りに、平均値周りの線形化近似に基づく分離係数を用いたものである。しかしながら、白木ら (2003) が用いた方法では、試行錯誤的に部分係数の組合せを変えて最適案を探索しなければならないため、場合によっては多くの労力を必要とする。鈴木ら (2002) が用いた方法では、安全率に基づいて設計された既設断面の保有信頼性指標が設計条件によって大きくばらついているため、それに応じて各感度係数もばらついてしまう。したがって、その平均値を用いて式(17)により部分係数を算出しても、あらゆる設計条件に対して合理的な設計結果は得られない可能性がある。また、長尾 (2001, 2002) が用いた分離係数では、各設計因子の感度が考慮できないため、合理的な設計結果が得られる保証はない。そこで本研究では、以下に述べるように、一次信頼性理論 (FORM) に従いながら、考え得る最善の方法によって部分係数を決定し、できる限り設計点を破壊点に一致させることを試みた。

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

目標信頼性指標については、考慮する事象が単一の破壊モードである場合には、現行設計法が担保する平均信頼性指標がそのまま目標値となる。しかしながら、本問題のように、事象が複数破壊モードの和事象で定義される直列システムの場合には、表-5に示したシステム信頼性指標の平均値 $\beta_{T,sys}$ をそのまま目標値 β_T とすることは

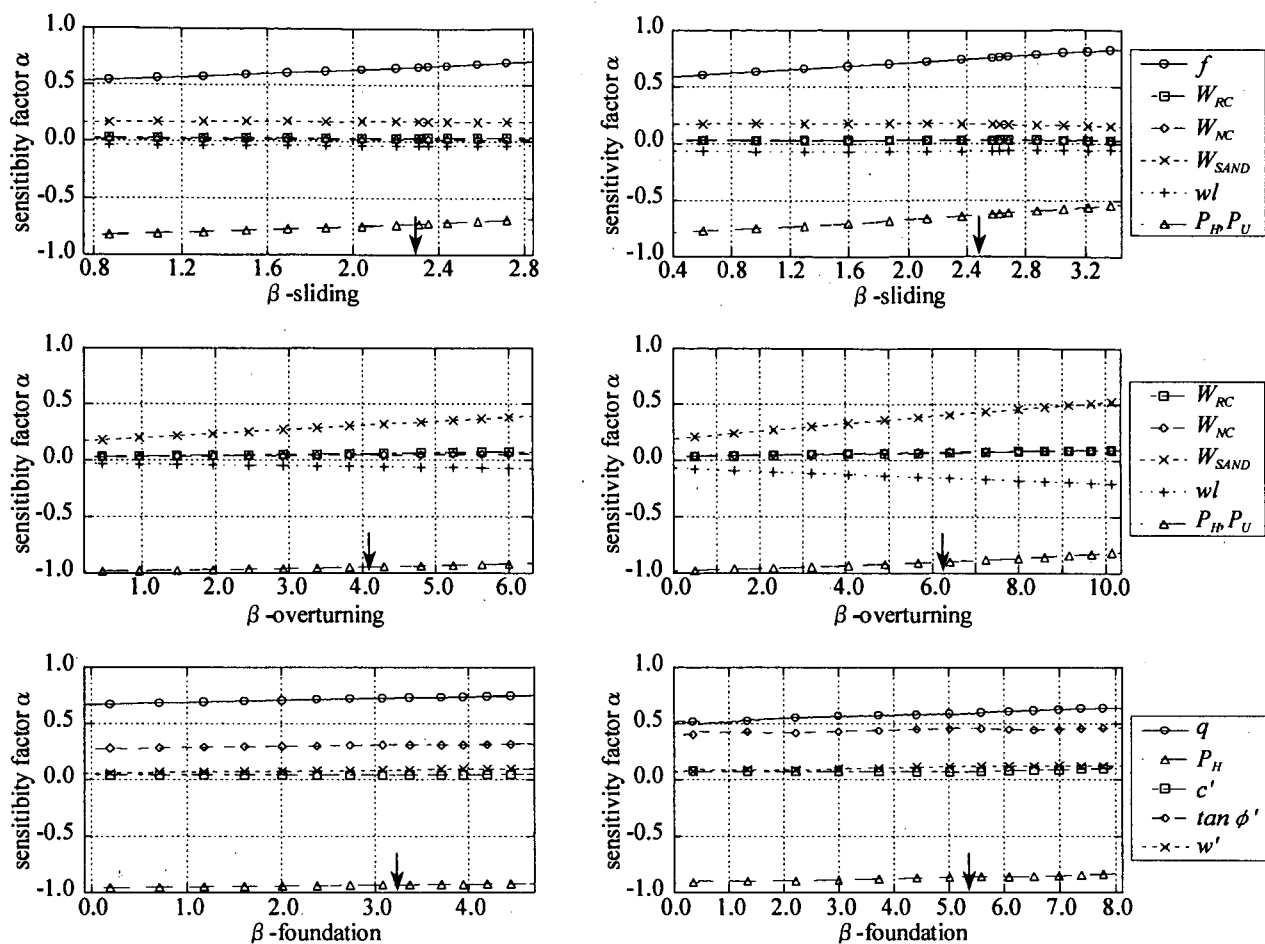
適切ではないと考えられる。なぜなら、仮に各モードの信頼性指標が $\beta_{T,sys}$ を満足するように設計したとしても、設計結果が保有するシステム信頼性指標は、必ず $\beta_{T,sys}$ を下回るからである。そこで本研究では、FORMにより $\beta_{T,sys}$ を満足する断面をまず決定し、その断面における各モードの信頼性指標のうちから最小値を抽出した。さらに、これを全事例について平均し、式(17)に用いる目標値 β_T とした。この方法により得られた信頼性指標は、ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤が2.40、上部斜面堤が2.24、直立消波ブロック堤が2.12、消波ケーソン堤が2.10となり、いずれも $\beta_{T,sys}$ よりも若干高い値となっている。

(2) 感度係数

続いて感度係数の評価方法について述べる。感度係数は、式(6)に示すように各設計因子が信頼性指標に及ぼす影響度を表す係数であるから、信頼性指標が変化すると、断面の変化によって堤体重量や浮力等の設計因子の特性値が変化するため、結果、感度係数も変化する。図-18は、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の各1事例について、信頼性指標と感度係数の関係を調べたものである。図中の○印等のマークは、堤体幅1mの変化を表す。ここで、滑動においてマークが密になっている箇所は、ケーソンの壁体幅ではなく、フーチング幅を変化させた所である。また、図中の矢印は、現行設計断面における信頼性指標を表す。本検討では堤体幅を15m程度変化させたが、転倒および支持力破壊モードの信頼性指標は堤体幅に対する変化度が大きいのに対し、滑動破壊モードについてはその変化度が小さいことが特徴である。表-6に、単位堤体幅に対する各信頼性指標の変化幅の全事例についての平均値を示すが、各信頼性指標の変化幅は、滑動が最も小さく、次いで支持力、転倒の順に大きくなっていることがわかる。これは、転倒や支持力破壊モードに対しては、堤体幅の変化が、堤体有効重量だけではなく、そのアーム長およびすべり円弧の半径にも影響するためである。

表-6 単位堤体幅当たりの信頼性指標変化幅 (全事例平均)

| 破壊モード | ケーソン式 混成堤 | 消波ブロック 被覆堤 |
|--------------------|--------------|---------------|
| 滑動 $\Delta \beta$ | 0.28 | 0.35 |
| 転倒 $\Delta \beta$ | 0.77 | 1.16 |
| 支持力 $\Delta \beta$ | 0.48 | 0.81 |



a) ケーソン式混成堤 (設置水深: 16.0m) b) 消波ブロック被覆堤 (設置水深: 11.5m)

図-18 信頼性指標と感度係数の関係

図-18より、鉄筋コンクリート重量等の感度の低い因子は、その感度係数が信頼性指標によってほとんど変化しないのに対し、摩擦係数、波力・揚圧力、中詰砂重量等の感度の高い因子は、その感度係数が信頼性指標に応じて変化することがわかる。例えば、図の滑動信頼性指標0.8および2.8における摩擦係数の感度係数には、有意な差が見られる。

したがって、本研究では、各破壊モード別に β_T を満足する断面をまず決定し、その断面における感度係数を全事例について平均した値を用いることとした。一例として、ケーソン式混成堤の滑動破壊モードにおける、現行設計断面と β_T を満足する断面での感度係数のばらつきを評価したものを図-19に示す。図より、上記の方法によって感度係数のばらつきが低減されるとともに、その平均値は、両者で有意に異なっていることがわかる。このように、目標信頼性指標 β_T に基づくレベル2信頼性設計を予め実施し、その断面における感度係数を評価する

ことによって、目標破壊確率に対する分散の小さい合理的な部分係数を得ることができると考えられる。

図-20は、この方法によって算出した感度係数の全事例についての平均値を示したものである。水平波力・揚圧力、摩擦係数、上載荷重、 $\tan \phi'$ 等の感度が高く、これらが、防波堤の外的安定問題に関する支配因子であることがわかる。特に、粘着力 c' よりも $\tan \phi'$ の方が高い感度を示すことは特筆に値する。ここで上載荷重は、式(11)に示す通り滑動側にも抵抗側にも寄与するにもかかわらず、その感度係数は高い正値を示している。この理由は次の通りである。まず、水平波力が増加すると揚圧力も増加することによって鉛直合力は減少する。ここで上載荷重の載荷幅は平均値で固定しているため、上載荷重と波力は負の相関を示す。したがって、式(8)における上載荷重の感度係数には波力の偏微分項が含まれ、これが負の相関係数と負の偏微分係数により正側の作用として寄与するからである。また、分割片重量も荷重側、抵抗側

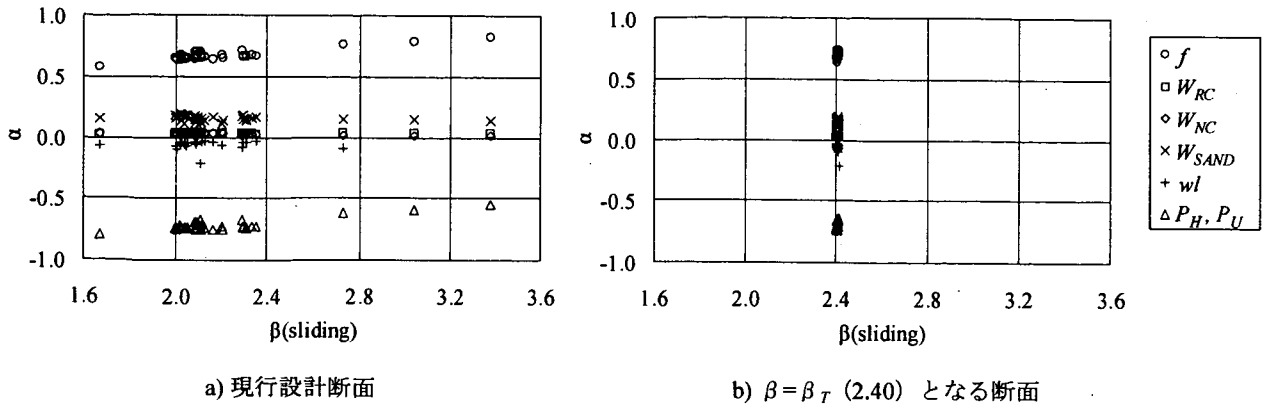


図-19 感度係数のばらつき (ケーソン式混成堤, 滑動破壊モード)

に寄与するが、感度係数はわずかな正値を示していることから、抵抗側への寄与の方が大きいことがわかる。

同一因子の感度係数を破壊モード別に比較すると、特に水平波力・揚圧力に関して有意な違いが見られる。これは、式(6a)に示したように、感度係数の絶対値は、単に各設計因子のばらつきの程度だけではなく、性能関数の偏微分係数によっても変化するためである。このことは、同一の設計因子であっても性能関数によって部分係数を区別する必要があることを意味する。また、同一因子の感度係数を構造形式別に比較しても、有意な違いが見られる。これは、表-2に示した波力算定式の推定精度や各設計因子の作用程度が、構造形式によって異なっているためである。このことはまた、構造形式によっても部分係数を区別する必要があることを意味する。

5.2 レベル1信頼性設計法の構築

(1) 部分係数の提案

以上の検討により得られた目標信頼性指標 β_T および各設計因子の確率分布 (表-2, 表-3), 感度係数 (図-20) を用い、式(17)によって算出した部分係数を表-7に示す。さらに、レベル1信頼性設計法の安全性照査式を以下に示す。

(滑動)

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (18)$$

(転倒)

$$a_1 \sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - a_2 P_{Bd} - a_3 \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq a_4 \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (19)$$

(支持力)

$$\left\{ \left[\gamma_c c'_k s + (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \gamma_{\tan \phi} \tan \phi'_k \right] \times \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi} \tan \phi'_k / F_f} \right\} / \gamma_a \left\{ \sum (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \sin \theta + a_5 \gamma_{P_H} P_{Hk} / r \right\} \geq F_f = 1.0 \quad (20)$$

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_{wl} wl_k + h) B_C \quad (21)$$

ここに、

γ : 添字の設計因子に対する部分係数

添字 k, d : それぞれ特性値および設計用値

F_f : 支持力安全率

ρ_w : 海水の密度 (kg/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

wl : 潮位 (m)

h : 水深 (m)

B_C : 堤体幅 (m)

その他の記号については、式(9)~式(11)と同一である。また、式(21)は、ケーソンがフーチングを有しない場合の浮力設計用値の算定式である。前節で述べた目標信頼性指標の違いや感度係数の違いにより、同一の設計因子であっても、構造形式や性能関数によって異なる部分係数を用いることとなる。ここで、消波ブロック被覆堤の水平波力・揚圧力に対する部分係数に 1.0 を下回る値があるのは、表-2 および表-3 より得られる波力の平均値の偏り B が、1.0 を大きく下回っているためである。支持力安全性照査式(20)における安全率 F_f は、簡易ビショップ法による収束計算において、抵抗モーメントが起動モ-

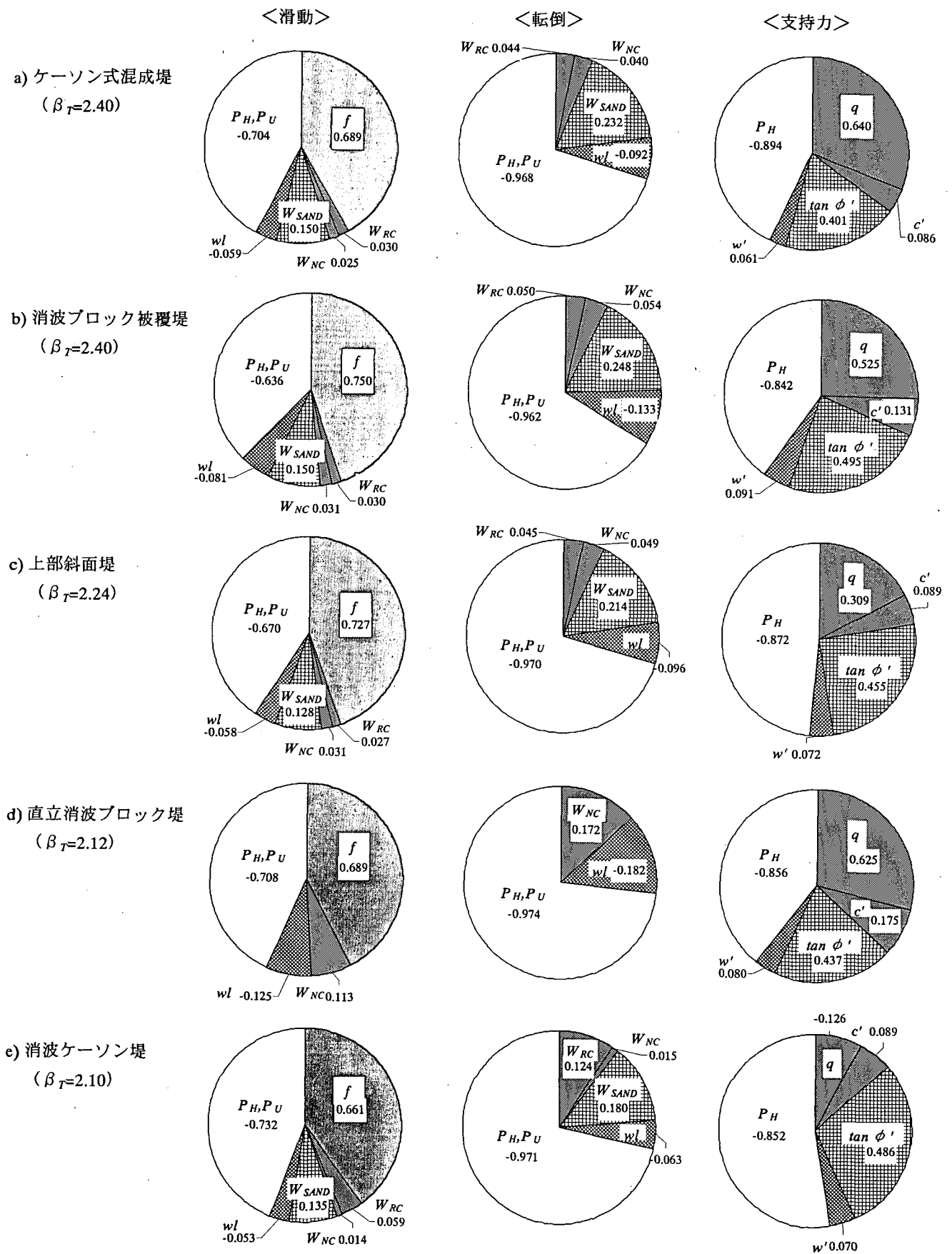


図-20 感度係数分布 (全事例平均)

表-7 部分係数

| r | | 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 | f | 0.79 | 0.77 | 0.80 | 0.83 | 0.84 | |
| | P_H, P_U | 水深変化 緩 | 1.04 | 0.91 | 1.05 | 1.09 | 1.07 |
| | | 水深変化 急 | 1.17 | 1.01 | 1.19 | 1.22 | 1.20 |
| | wl | $r_w=1.5$ | 1.03 | 1.04 | 1.03 | 1.05 | 1.02 |
| | | $r_w=2.0, 2.5$ | 1.06 | 1.08 | 1.05 | 1.11 | 1.04 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | W_{RC} | 0.98 | 0.98 | 0.98 | — | 0.98 | |
| W_{NC} | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | | |
| W_{SAND} | 1.01 | 1.01 | 1.01 | — | 1.01 | | |
| 転倒 | P_H, P_U | 水深変化 緩 | 1.15 | 1.01 | 1.17 | 1.20 | 1.16 |
| | | 水深変化 急 | 1.31 | 1.14 | 1.33 | 1.34 | 1.30 |
| | wl | $r_w=1.5$ | 1.04 | 1.06 | 1.04 | 1.08 | 1.03 |
| | | $r_w=2.0, 2.5$ | 1.09 | 1.13 | 1.09 | 1.15 | 1.05 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | W_{RC} | 0.98 | 0.98 | 0.98 | — | 0.97 | |
| | W_{NC} | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.01 | 1.02 | |
| W_{SAND} | 1.00 | 1.00 | 1.00 | — | 1.00 | | |
| 支持力 | P_H | 水深変化 緩 | 1.12 | 0.97 | 1.13 | 1.15 | 1.12 |
| | | 水深変化 急 | 1.26 | 1.09 | 1.28 | 1.28 | 1.25 |
| | q | 0.55 | 0.34 | 0.63 | 0.62 | 0.65 | |
| | $2b'$ | 1.89 | 3.25 | 2.18 | 1.65 | 1.73 | |
| | W' | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| | $\tan \phi'$ | 0.96 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.96 | |
| | c' | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | |
| a | 構造解析係数 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.76 | 0.92 | |

ーメントを上回ることを確認するための補助パラメータである。また、上載荷重の特性値 q_k は、波力、浮力および堤体重量の部分係数を用いない特性値をもとに計算される値であることに注意を要する。さらに上載荷重載荷幅 $2b'$ (等分布荷重に換算した上での載荷幅) に対する部分係数は、その特性値を平均値に変換するための係数である。万一、これによってケーソン堤体幅よりも広い載荷幅となってしまうような場合は、表-2 および表-3 に示した設計因子の平均値の偏りを用いて、 $2b'$ の平均値を正しく計算することができる。

また、4.1 で述べたとおり、支持力信頼性指標の計算においては、簡易ビショップ法による性能関数自体に内在する安全性の余裕度を考慮するため、水平波力を作用させる位置をマウンド上面ではなく水平波圧の重心位置としている。しかしながら、レベル1設計において水平波力の作用位置を波圧の重心位置に変更することは、設

計者の便を考えると得策ではない。そこで、レベル1設計における支持力安全性照査においては、この点を考慮するために構造解析係数に相当する γ_a を導入することとした。 γ_a の決定方法は、次に述べる目標システム破壊確率に対する分散最小案とした。支持力安全性照査が支配的となるケースは少ないため、ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤ならびに上部斜面堤については、 γ_a を 1.0 としても設計結果に対する影響度は小さかった。しかし、直立消波ブロック堤や消波ケーソン堤については、水平波力を作用させる位置の影響が強く生じるため、 γ_a によって起動モーメントの設計用値を減ずる結果となった。

通常、部分係数の最適案の判定は次式によって行う。すなわち、目標システム破壊確率 P_{FT} とレベル1設計結果が保有するシステム破壊確率 P_{FL} の分散が最小となる案を最適案として採用する。

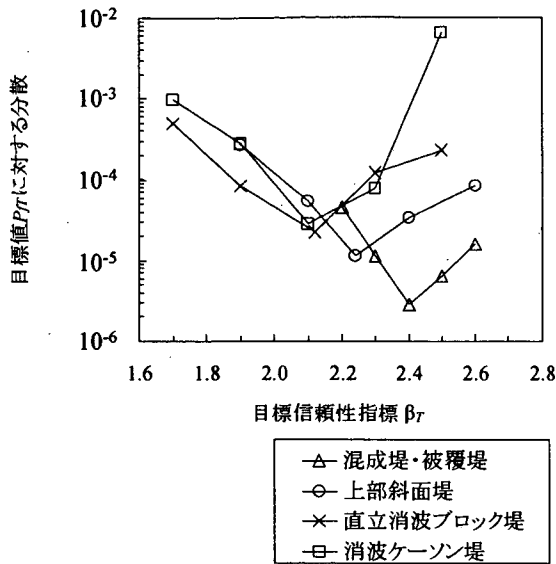
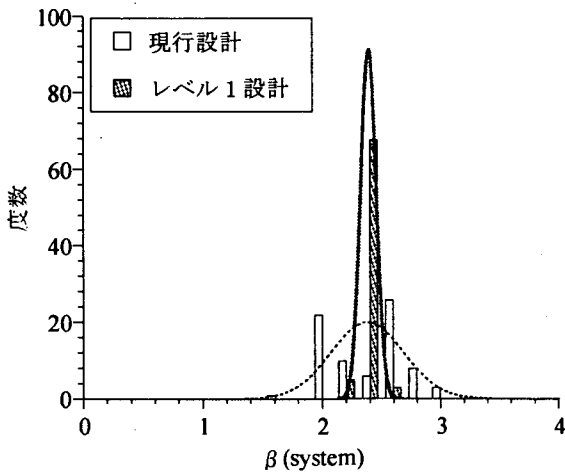


図-21 最適案の判定

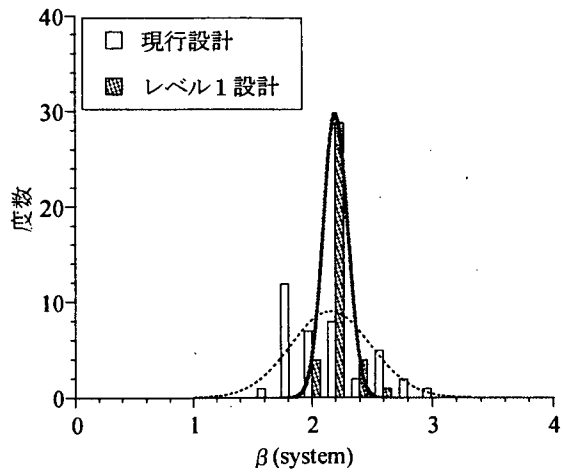
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{T,i} - P_{T,i})^2 \rightarrow \min \quad (22)$$

式(17)に用いる β_T を変化させた場合の式(22)による判定結果を図-21 に示す。いずれの構造形式も、前節で定めた β_T において目標値に対する分散が最小となっており、今回構築した部分係数のキャリブレーションが適切になされていると判断できる。

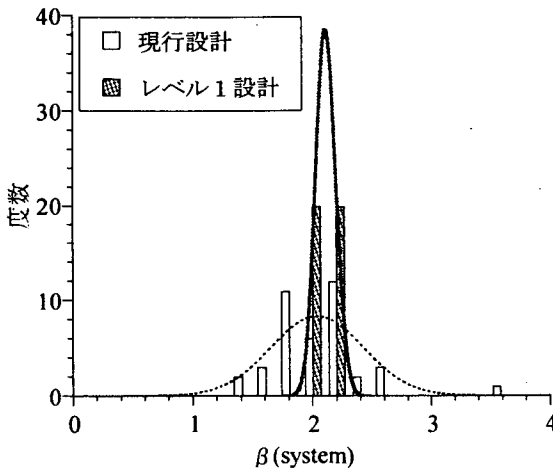
図-22 は、レベル1 設計法と現行設計法が保有するシステム信頼性指標のばらつきを比較したものである。いずれの構造形式も、レベル1 設計法によるシステム信頼性指標のばらつきは、現行設計に比較して極めて小さくなっているとともに、その平均値は現行設計と同程度になっていることがわかる。また、両設計法による設計結



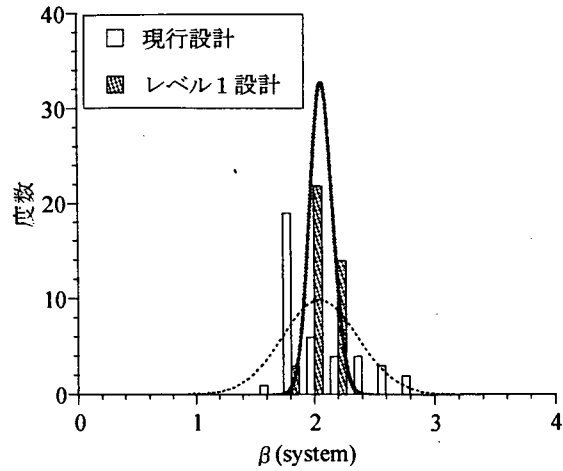
a) ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤



b) 上部斜面堤



c) 直立消波ブロック堤



d) 消波ケーソン堤

図-22 システム信頼性指標のばらつき

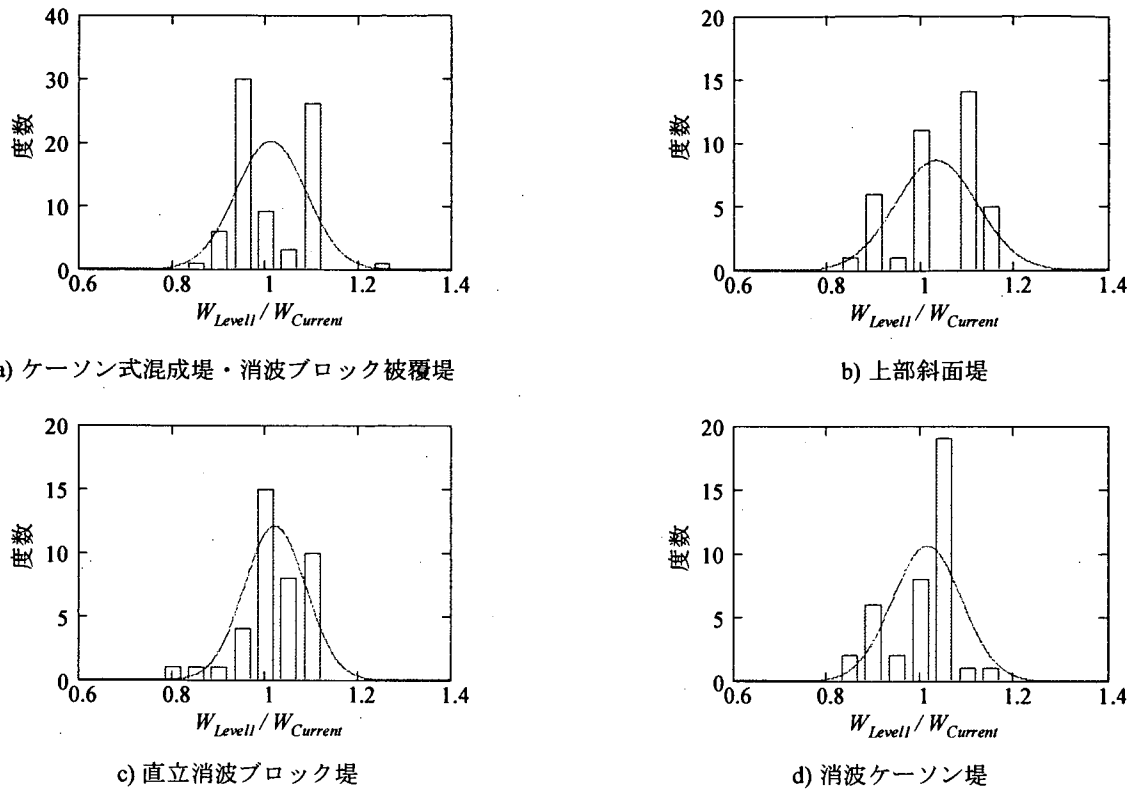


図-23 堤体重量比の分布

果の堤体重量比（レベル1設計/現行設計）のヒストグラムを図-23に示す。いずれの構造形式も、堤体重量比は80%~120%程度に分布しており、レベル1設計法の適用によってコスト縮減になるケースもコスト増大になるケースも存在する。ただし、その平均値は、ケーン式混成堤および消波ブロック被覆堤が101%、上部斜面堤が103%、直立消波ブロック堤が102%、消波ケーン堤が101%となっており、全国平均的に見た堤体重量は、現行設計法と同程度に保たれている。また、ケーン式混成堤および消波ブロック被覆堤については、表-5に示した平均安全性水準の違いにより、ケーン式混成堤は全体的にコスト増大、消波ブロック被覆堤は全体的にコスト縮減となる。

以上のことから、今回構築したレベル1設計法によって、平均的な建設コストは従来どおりとしたまま、過度に安全もしくは過度に危険な施設が減少し、合理的な設計が可能となる。

(2) 港内側マウンド肩幅への影響

前項までに構築したレベル1設計法は、防波堤直立部の安定性に関するものであり、設計によって決定される断面諸元は、直立部の堤体幅およびフーチング幅である。しかしながら、支持力安全性照査においては、捨石マウ

ンドの形状（厚さ、肩幅、勾配）によっても安全性が変化するため、直立部の堤体幅およびマウンド形状を含めた最適設計問題と捉えることもできる。マウンド厚さについては、堤体重量の荷重分散効果、衝撃砕波力の作用回避、建設コストの観点からある程度決定されること、マウンド勾配は一般的に1:2または1:3が用いられることを考慮すると、支持力安全性照査によって決定される断面諸元は、直立部の堤体幅および港内側のマウンド肩幅であると考えられる。

今回提案するレベル1設計法の支持力安全性照査においては、これまでの安全率による照査よりも安全性を高く評価することとなる。このため、レベル1設計によって生じる安全性の余裕分を港内側の肩幅削減によって吸収させ、コスト縮減を得ようとする傾向の増加が懸念される。しかしながら、捨石マウンド強度の特性値として一般的に用いられる粘着力 $c_k = 20 \text{ kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi_k = 35^\circ$ は、直立部を挟んだ両肩部からの拘束圧によって初めて発揮されるものであるから、マウンド肩幅を大きく削減することは危険である。したがって、港内側のマウンド肩幅に関しては、式(20)に示した支持力安全性照査式によらず、ある程度の余裕を持った幅が必要であると考えられる。なお、付録Bに「港湾構造物収覧（国総研、1972~2000）」に基づき、ケーン式防波堤の港

内側マウンド肩幅に関する統計解析結果を示すので、その目安として参照されたい。

6. 結論

本研究では、重力式防波堤の外的安定問題（滑動、転倒、支持力）に関する現行設計法の安全性評価および部分係数のコードキャリブレーションを実施した。得られた主要な結論を以下に示す。

① 既往の研究事例を収集し、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）に用いられている波力算定式の推定精度を評価した。その結果、近年開発された重力式特殊防波堤の波力算定精度には安全性の余裕度があまり見込まれていないこと、砕波力の影響を受けない消波ブロック被覆堤のみ、波力推定時のばらつきが小さいことを明らかにした。

② 評価した波力算定式の推定精度を加えた信頼性解析FORMにより、5形式の重力式防波堤（ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤および重力式特殊防波堤）に対する現行設計法の安全性評価を実施した。その結果、重力式防波堤は、既往の研究と同様に、滑動安全性が最も低く支配モードであると言えるが、重力式特殊防波堤については転倒安全性も若干低下していることを明らかにした。これは、重力式特殊防波堤の場合、鉛直下向き波力の作用や消波性能によって滑動安全性を向上させ、堤体幅縮減が可能となった反面、転倒安全性が相対的に低くなっているものである。

③ FORMにより算出される感度係数を用い、滑動、転倒、支持力の各破壊モード間の相関性を明らかにした。その結果、現行設計断面において、各破壊モード間にはいずれも高い正の相関があり、滑動破壊が支配モードであることと併せて判断すると、滑動を伴わない転倒破壊や支持力破壊は極めて少ないものと考えられる。これは、過去の被災事例とも良く整合している。

④ 各破壊モードの信頼性指標およびモード間の相関係数を用い、現行設計断面におけるシステム信頼性指標を評価した。その結果、重力式特殊防波堤のシステム信頼性指標は、一般的なケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤に比べてばらつきが大きくなっていると同時に、その平均値も若干低いことを明らかにした。

⑤ 評価した現行設計法の平均システム信頼性指標を目標値とし、部分係数のコードキャリブレーションを実施した。部分係数の算出に用いる目標信頼性指標については、目標システム信頼性指標を満足する断面の各モード

信頼性指標の最小値を、全事例について平均して算出した。さらに、部分係数の算出に用いる感度係数については、目標信頼性指標を満足する断面における値を全事例について平均して算出した。本キャリブレーション法を用いることにより、目標安全性水準とのばらつきの小さい合理的な部分係数を得ることができると考えられる。また、評価した感度係数は、同一の設計因子であっても、構造形式や性能関数によって値が異なるため、部分係数もこれらによって区別する必要がある。

⑥ レベル1信頼性設計に用いる部分係数を提案するとともに、目標システム破壊確率との分散最小の観点からそれが最適であることを示した。さらに、今回構築したレベル1設計によって、平均的な建設コストは従来どおりとしたまま、合理的な設計が可能となることを示した。

7. あとがき

本研究は、力の釣合いに基づく従来設計の利便性を維持しつつ、設計の合理性の向上を図ったものである。したがって、提案するレベル1信頼性設計法は、安全率に基づく現行設計法に代わる標準設計法として位置づけられるものであり、レベル2以上の信頼性設計や変形量に基づく信頼性設計などの、より高度な設計手法の適用を何ら阻害するものではない。設計の合理性のさらなる向上、変形量に基づく設計法との整合性、建設コスト縮減という観点から、今後の課題および将来的展望として、以下の点が挙げられる。

(1) 設計因子の推定精度の向上

本研究では、防波堤の安全性に大きな影響を及ぼす波力算定式の推定精度を、既往の実験事例に基づき評価した。しかしながら図-8に示したように、特に直立消波ブロック堤については、推定精度の分布形を正規分布に仮定することや平均値の偏りの有意性に若干の疑義が生じている。これは、これまでの研究事例が推定精度という観点からはあまり評価されていないため、精度を評価可能なサンプル数が極めて少ないことが要因である。さらに言えば、実験方法や実験装置等にも実現象との不整合が生じる可能性がある。今後、設計因子の新たな算定式を提案する場合には、その推定精度を適切に評価することが、信頼性設計法の普及を図るためにも期待される。

また本研究では、安全率に代わって部分係数を導入することにより合理的な設計が可能になることを示したが、部分係数を導入するもう1つのメリットは、高度な解析や実験、研究の進展等により設計因子の推定精度が向上

した場合に、対象となる部分係数のみを修正することによって設計結果に反映させることができる点にある。著者ら(2004a)は、仮に波力算定式の推定精度が向上した場合に、変動係数のみを新たな値に変え、式(17)を用いて波力の部分係数を修正することにより、設計の合理性を維持しながらも経済的な設計が可能になることを示している。付録Cに部分係数の詳細を示すので、この方法により部分係数を簡易に修正することができる。

(2) 目標安全性水準の変化

本研究では、現行設計法の安全性水準が重力式防波堤の各構造形式によって異なっていたため、その目標値もそれぞれの平均安全性水準とし、部分係数のキャリブレーションを実施した。これは、現行設計法とレベル1設計法による設計結果の連続性に重点をおいたためであるが、重力式防波堤としてただ1つの目標安全性水準を定める方法も当然考えられる。このような場合は、同じく付録Cをもとに、目標信頼性指標のみを新たな値に変え、部分係数を簡易に修正することができる。ただし、目標信頼性指標や前述した設計因子の推定精度が大きく変化する場合、部分係数の修正方法に注意が必要である。詳細は、著者(2005)を参照されたい。

(3) 滑動量に基づく設計法との対応

変形量を制御対象とした信頼性設計法として、前述した下迫・高橋(1998)の滑動量に基づく設計法がある。これは、設計供用期間中の来襲波群による累積滑動量を、モンテカルロ法による確率変形量として性能を評価する方法である。下迫・高橋(1998)は、ケーソン式混成堤にこれを適用し、一般的には現行設計法よりも経済的な断面が得られるが、大水深防波堤や内湾での防波堤など水深に比べて波高の小さい重複波領域においては、現行設計法よりもむしろ大きな断面が必要となり得ることを指摘している。さらにGoda(2001)は、設計供用期間中の滑動量は波浪の極値分布形によっても変動することを示している。これらのことは、力の釣合いに基づいて安全性を制御しても、変形量の観点からは制御されていない可能性があり、波浪の継続時間や極値分布形によって変形量が増加することを意味している。

本研究で提案するレベル1設計法によると、ケーソン式混成堤は概して堤体幅が増加するため、滑動量の観点からも安全な設計になるものと考えられるが、今後、より詳細な検討を加える必要がある。具体的には、碎波・重複波を表す波高水深比 h/H_0' (h :堤前水深、 H_0' :換算沖波波高)や、Goda(2001)が提案する波浪の極値分布形を表す裾長さパラメータ γ_{50} (50年確率沖波波高に対する10年確率沖波波高の比)等を説明変量として、滑動安

全性照査に用いる部分係数を修正する方法が考えられる。(4) LCC最小化原則に基づく設計

本研究で提案する部分係数は、現行設計法の平均安全性水準を目標値としたキャリブレーション結果であるため、レベル1設計法の適用による建設コスト削減効果は期待できない。これに対する代替案として、建設コスト削減の観点から、ライフサイクルコスト(LCC)が最小となる安全性水準を目標値とする考え方がある。著者ら(2004b)は、力の釣合いに基づくLCC最小化設計法によっても、変形量(滑動量)に基づくLCC最小化設計法よりも安全側でありながら、現行設計法よりも経済的な設計が可能となるケースが多いことを明らかにしている。今後は、LCC最小化を考慮したレベル1信頼性設計法について検討を行う必要がある。

(2004年11月15日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、既往の研究事例の収集および評価について(株)ドラムエンジニアリングのご協力を得るとともに、五洋建設(株)技術研究所 森屋陽一氏(前港湾施設研究室研究官)および電源開発(株)鷲尾朝昭氏(前港湾施設研究室交流研究員)にご指導頂きました。独立行政法人港湾空港技術研究所耐波研究室の下迫室長には、特に消波ケーソン堤の波力算定方法について貴重な助言を頂きました。また、港湾施設研究室をはじめ多くの方々の多大なるご協力を得ることによって本研究をとりまとめることができました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 運輸省港湾局監修(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会。
- 大堀晃一・森川雅行・大野光嘉・石田国夫(1986): 上部斜面堤に作用する波力に関する実験的研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.357-361。
- 奥村樹郎・土田 孝(1981): 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。
- 尾崎竜三・長尾 毅(2004): 摩擦増大マットを用いたケーソン式防波堤の耐震性能に関する研究, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.155-160。
- 河合弘泰, 高山知司, 鈴木康正, 平石哲也(1997): 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.
- 合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.12, No.3, pp.31-69.
- 国土技術政策総合研究所・港湾研究部・港湾施設研究室(1972~2000): 港湾構造物収覧, No.1~244.
- 国土交通省(2002): 土木・建築にかかる設計の基本.
- 小林正樹, 寺師昌明, 高橋邦夫, 中島謙二郎, 小谷 拓(1987): 捨石マウンドの支持力の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.2, pp.371-411.
- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三(1992): 消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性一那覇港大水深域における新構造防波堤の開発一, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.556-560.
- 下迫健一郎・高橋重雄(1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, Vol.37, No.3, pp.3-30.
- 白木 渡, 松島 学, 堂垣正博, 井面仁志(2003): 道路橋鋼製橋脚の耐震信頼性設計に用いる部分安全係数の試算, JCOSSAR2003論文集, pp.961-968.
- 鈴木 誠, 辻岡信也, 菊池喜昭, 山本修司, 石井 清(2002): 部分係数を導入した矢板式係船岸の設計法の検討, 土木学会論文集, No.701, III-58, pp.401-408.
- 高橋重雄・谷本勝利(1984): 直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力(第2報)一現地観測波圧データの解析一, 港湾技術研究所報告, Vol.23, No.2, pp.3-25.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎(1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港湾技術研究所報告, Vol.29, No.1, pp.53-75.
- 高橋重雄・下迫健一郎・佐々木均(1991): 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.4, pp.3-34.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.676-680.
- 竹中秀夫・西田 穰・榊原 弘・殿最浩司・佐藤広章(1999): 現地観測結果を用いた波浪変形計算および波力の推定精度に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.826-830.
- 谷本勝利・吉本靖俊(1982): 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.21, No.3, pp.43-77.
- 長 尚(1995): 基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂.
- 土田 孝・湯 怡新(1996): 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.
- 長尾 毅(2001): 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.
- 長尾 毅(2002): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の提案, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.4, 26p.
- 長尾 毅・尾崎竜三(2004): ケーソン式防波堤の耐震性能設計に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.219-228.
- 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆(1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.313-316.
- 星谷 勝, 石井 清(1986): 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利(1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.706-710.
- 堀川 洋・神田 勝己・堀家 正(1989): ケーソン式混成防波堤構造諸元の統計的分析, 港湾技術研究所資料, No.644, 37p.
- 森平倫生・国田 治(1979): 斜面壁堤の水理特性に関する模型実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.295-298.
- 柳生忠彦・湯坐美幸(1980): 直立消波ブロック式防波堤構造集覧, 港湾技術研究所資料, No.358, 314p.
- 吉岡 健・長尾 毅(2004a): ケーソン式防波堤におけるレベル1信頼性設計法の合理的な適用方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.856-860.
- 吉岡 健・長尾 毅(2004b): ケーソン式防波堤のライフサイクルコスト最小化法に関する一考察, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.871-875.
- 吉岡 健・長尾 毅(2005): 信頼性の変化に対応した部分安全係数の設定方法, 構造工学論文集, Vol.51A(印刷中).
- 吉田郁政・鈴木修一(2003): 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.49A, pp.201-206.
- Cornell, C. A. (1969): A Probability-Based Structural code, Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No.12, pp.974-985.
- Ditlevsen, O. (1979): Narrow reliability bounds for structural systems, Jour. of Struct. Mechanics, Vol.7, No.4, pp.453-472.
- Goda, Y. (2001): Performance-based design of faissou

breakwaters with approach to extreme wave statistics, Coastal Engineering Journal, JSCE, Vol.43, No.4, pp.289-316.

Hasofer, A. M. and Lind, N. C. (1974): Exact and Invariant Second moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121.

Owen, D. B. (1956): Tables for computing bivariate normal probabilities, Ann, Math. Stat., Vol.27, pp. 1075-1090.

Takayama, T. and N. Ikeda (1993): Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.31, No.5, pp.3-32.

付録A 用語の定義

性能規定型設計 (performance-based design) : 設計された構造物が要求性能さえ満足していれば、どのような構造形式や構造材料, 設計手法, 工法を用いてもよいとする設計方法. より具体的には, 構造物の目的とそれに適合する機能を明示し, 機能を備えるために必要とされる性能を規定し, 規定された性能を構造物の設計供用期間中確保することにより機能を満足させる方法. 性能規定型設計の対義は, 仕様規定型設計と呼ばれる.

仕様規定型設計 (specification-based design) : 具体的な構造材料の種類や寸法, 解析手法等が指定されており, それに基づいて設計する方法. 多くの現行設計基準はこれにあたる.

限界状態設計法 (limit state design method) : 照査すべき限界状態を明確にした設計法. 照査フォーマットとして信頼性理論のレベル1にあたる**部分係数法 (partial factor design)**を採用することがほとんどであるため, 部分係数法が限界状態設計法と同義で使われることもある.

信頼性設計法 (reliability-based design method) : 構造物がいかに壊れるかに基づいた確率論的手法による設計法. 具体的には, 構造物が設計供用期間において, ある限界状態 (終局限界, 使用限界など) に相当する複数の危険状態, すなわち**破壊モード (Failure Mode)**を抽出し, 設計に介在する様々な不確実性のもとで各破壊モードを確率的にどの程度の発生頻度におさまたらよいかに基づいた設計法.

設計因子 (design parameter) : ある破壊モードにおける破壊可能性もしくは安全性を評価するために必要な荷重や抵抗などの総称. 例えば, 防波堤の滑動破壊モードの場合, 水平波力, 揚圧力, 浮力, 摩擦係数, 自重が設計因子となる. 多くの場合, これらは様々な不確実性を有する. 信頼性設計法においてこれらは**確率変数 (design variable)**とよばれ, 適切な確率分布 (正規分布, 対数正規分布, ワイブル分布など) を割り当てる必要がある.

変動係数 V (coefficient of variation) : 確率変数 X の標準偏差 σ_X をその平均値 μ_X で除したもの. つまり, 標準偏差を無次元化したものであり, 次元の異なる確率変数のばらつきの程度を表す指標として用いられる.

平均値の偏り B (bias of mean value) : 確率変数 X の平均値 μ_X をその特性値 X_k (現行設計法で用いる値) で除したもの. つまり, 特性値に含まれる安全性の余裕

度を表し, 一般に荷重側の因子については1以下, 抵抗側の因子については1以上の値となる.

破壊確率 P_f (probability of failure) : 構造物の破壊可能性を表す定量的尺度であり, 信頼性設計法においては最も高位のレベル3に属する.

信頼性指標 β (reliability index) : 安全性指標 (safety index) と呼ばれ, 構造物の安全性を表す定量的尺度. 破壊確率 P_f の代りとして用いられ, $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$ によって破壊確率 P_f と関連付けられる. ここで, Φ は標準正規確率分布関数である. 信頼性設計法においてはレベル2に属する.

部分係数 γ (partial factor) : 構造物の安全性を満足するための余裕を各設計パラメータに付加させるために乗じる係数. 各設計因子の特性値 (characteristic value) に部分係数を乗じた値を設計用値 (design value) と呼ぶ. 部分係数法は, 信頼性設計法においては最も平易なレベル1に属する.

信頼性解析 (reliability analysis) : 設計因子の従う確率分布をもとに, 構造物のある破壊モードにおける破壊確率 P_f もしくは信頼性指標 β を計算するための解析. 前者については, 結合確率密度関数の数値積分によって算出する方法の他, モンテカルロシミュレーションによっても計算できる. 後者は, **性能関数 (performance function)** の線形化近似に基づく1次信頼性理論 FORM (First-Order Reliability Method) によって計算される. ここで, 性能関数とは, ある破壊事象を正確に表現するための算定式であり, **限界状態関数 (limit state function)** とも呼ばれる.

システム信頼性指標 (system reliability index) : 複数の破壊モードを持つ構造系 (structural system) 全体の信頼性指標. 例えば, 重力式防波堤の外的安定問題 (滑動, 転倒, 支持力破壊モード) では, 単一モードの破壊確率もしくは信頼性指標を制御するのではなく, 構造系を1つのシステムとしてとらえ, その破壊確率もしくは信頼性指標を評価し, 制御する必要がある.

感度係数 α (sensitivity factor) : 標準化空間 (確率変数を平均値0, 標準偏差1に標準化した正規空間) における信頼性指標の各確率変数軸への方向余弦を表す. つまり, 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.

付録B 港内側マウンド肩幅に関する統計解析

「港湾構造物収覧(国総研, 1972~2000)」に基づき, ケーソン式防波堤の港内側マウンド肩幅に関する統計解析を行った。

図-B.1 は, 港外側, 港内側のマウンド肩幅別施設数を調べたものである。マウンド肩幅は施設毎に大きく異なっているが, 大半は5mから10mの範囲にある。その平均値は, 港外側で11.9m, 港内側で9.0mとなっており, 港外側の方が若干広めである。堀川ら(1989)も, 1986年までの統計資料に基づき同様の結果を示しており, マウンド肩幅は波の荒いところで, 少なくとも5m以上の幅をとることが普通であると記している。

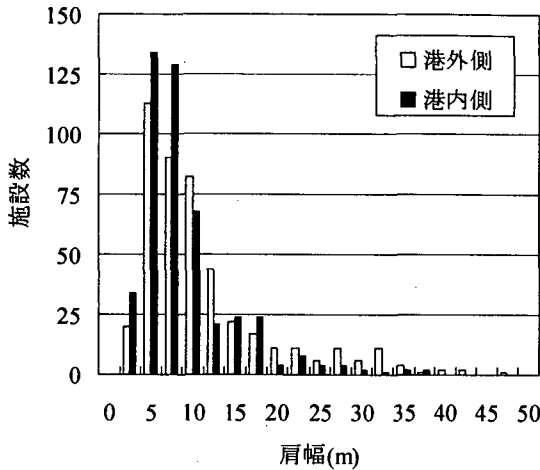


図-B.1 マウンド肩幅別施設数

図-B.2 は, 港内側マウンド肩幅 BM_2 と設計条件や堤体諸元との相関を調べたものである。ここで, 図の堤体高は, ケーソン高 H_C と上部工厚さ T_U (パラペット含まない) を表し, 堤体幅 B_C はフーチング幅を含んでいない。また, 図中の R^2 は決定係数である。港内側マウンド肩幅は, 堤体高や堤体幅に関して若干の相関が見られるが, 有義波高との相関は低い。その他, 最高波高や設置水深などを調べたが, 明確な相関は見られなかった。図-B.2 に示した各諸元を説明変量として, 線形重回帰分析を行った結果, 得られた回帰式(単位 m) を次式に示す。

$$BM_2 = 1.0 + 0.2H_{1/3} + 0.3(H_C + T_U) + 0.2B_C \quad (B.1)$$

式(23)による推定結果の重決定係数は 0.16 であり, 推定精度は高くはないが, 港内側マウンド肩幅を設計する上での参考値とすることができる。

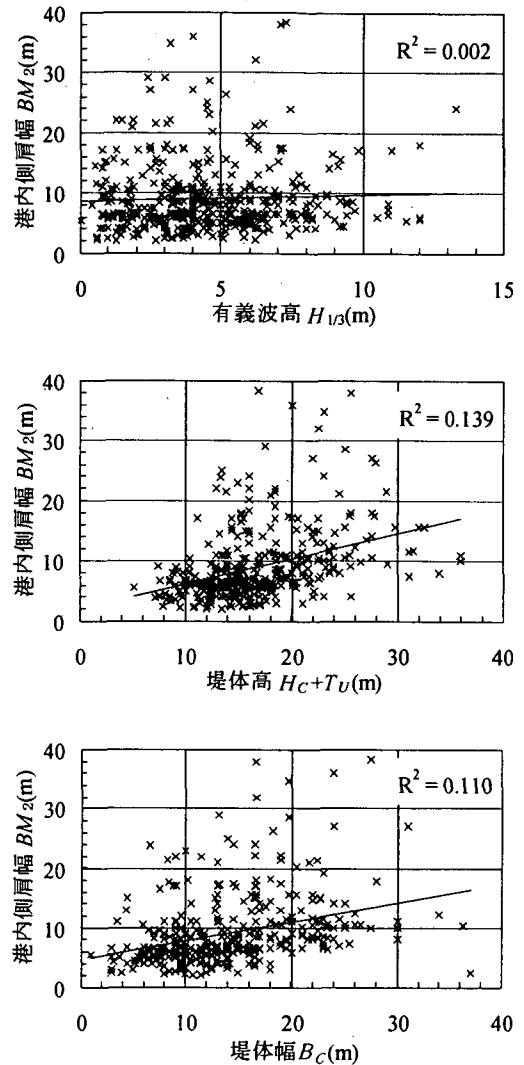


図-B.2 港内側マウンド肩幅との相関

付録C 部分係数一覧（詳細）

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

γ_X : 部分係数

β_T : 目標信頼性指標

V_X : 変動係数

B_X : 平均値の偏り（平均値と特性値の比）

表-C.1 ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤

| | | ケーソン式 混成堤 | | | | 消波ブロック 被覆堤 | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------------------------|--------|--------|-------|---------------|--------|--------|-------|-------|
| 目標システム信頼性指標 β_T | | 2.38 | | | | | | | | |
| 目標システム破壊確率 Pf_T | | 0.0087 | | | | | | | | |
| γ 計算に用いる目標信頼性指標 β_T | | 2.40 | | | | | | | | |
| | | γ | a | B | V | γ | a | B | V | |
| 滑動 | 摩擦係数 f | 0.79 | 0.689 | 1.060 | 0.150 | 0.77 | 0.750 | 1.060 | 0.150 | |
| | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.04 | -0.704 | 0.740 | 0.239 | 0.91 | -0.636 | 0.702 | 0.191 | |
| | 揚圧力 P_U 水深変化急 | 1.17 | | 0.825 | 0.251 | 1.01 | | 0.772 | 0.205 | |
| | 潮位 wl | $r_{wl} = 1.5$ | 1.03 | -0.059 | 1.000 | 0.200 | 1.04 | -0.081 | 1.000 | 0.200 |
| | | $r_{wl} = 2.0 \sim 2.5$ | 1.06 | | 1.000 | 0.400 | 1.08 | | 1.000 | 0.400 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - |
| | 自重 | W_{RC} 鉄筋コンクリート | 0.98 | 0.030 | 0.980 | 0.020 | 0.98 | 0.030 | 0.980 | 0.020 |
| | | W_{NC} 無筋コンクリート | 1.02 | 0.025 | 1.020 | 0.020 | 1.02 | 0.031 | 1.020 | 0.020 |
| | | W_{SAND} 中詰砂 | 1.01 | 0.150 | 1.020 | 0.040 | 1.01 | 0.150 | 1.020 | 0.040 |
| | 転倒 | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.15 | -0.968 | 0.740 | 0.239 | 1.01 | -0.962 | 0.702 | 0.191 |
| 揚圧力 P_U 水深変化急 | | 1.31 | 0.825 | | 0.251 | 1.14 | 0.772 | | 0.205 | |
| 潮位 wl | | $r_{wl} = 1.5$ | 1.04 | -0.092 | 1.000 | 0.200 | 1.06 | -0.133 | 1.000 | 0.200 |
| | | $r_{wl} = 2.0 \sim 2.5$ | 1.09 | | 1.000 | 0.400 | 1.13 | | 1.000 | 0.400 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - |
| 自重 | | W_{RC} 鉄筋コンクリート | 0.98 | 0.044 | 0.980 | 0.020 | 0.98 | 0.050 | 0.980 | 0.020 |
| | | W_{NC} 無筋コンクリート | 1.02 | 0.040 | 1.020 | 0.020 | 1.02 | 0.054 | 1.020 | 0.020 |
| | | W_{SAND} 中詰砂 | 1.00 | 0.232 | 1.020 | 0.040 | 1.00 | 0.248 | 1.020 | 0.040 |
| 支持力 | | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.12 | -0.894 | 0.740 | 0.239 | 0.97 | -0.842 | 0.702 | 0.191 |
| | | 水深変化急 | 1.26 | | 0.825 | 0.251 | 1.09 | | 0.772 | 0.205 |
| | 上載荷重 q | 0.55 | 0.640 | 0.605 | 0.061 | 0.34 | 0.525 | 0.367 | 0.058 | |
| | 上載荷重 載荷幅 $2b'$ | 1.89 | - | - | - | 3.25 | - | - | - | |
| | 分割片重量 w' | 1.00 | 0.032 | 1.000 | 0.030 | 1.00 | 0.047 | 1.000 | 0.030 | |
| | $\tan \phi'$ | 0.96 | 0.288 | 1.000 | 0.059 | 0.95 | 0.353 | 1.000 | 0.061 | |
| | 粘着力 c' | 0.99 | 0.072 | 1.000 | 0.059 | 0.99 | 0.112 | 1.000 | 0.061 | |

※) 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

※) 水平波力・揚圧力，上載荷重の確率分布（ B ， V ）は，表-2および表-3をもとに算出した値

表-C.2 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 | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------------------------|--------|--------|-------|-----------|--------|--------|-------|----------|--------|--------|-------|-------|
| 目標システム信頼性指標 β_T | | 2.16 | | | | 2.04 | | | | 2.05 | | | | |
| 目標システム破壊確率 Pf_T | | 0.015 | | | | 0.021 | | | | 0.020 | | | | |
| γ 計算に用いる目標信頼性指標 β_T | | 2.24 | | | | 2.12 | | | | 2.10 | | | | |
| | | γ | a | B | V | γ | a | B | V | γ | a | B | V | |
| 滑動 | 摩擦係数 f | 0.80 | 0.727 | 1.060 | 0.150 | 0.83 | 0.689 | 1.060 | 0.150 | 0.84 | 0.661 | 1.060 | 0.150 | |
| | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.05 | -0.670 | 0.777 | 0.232 | 1.09 | -0.708 | 0.812 | 0.230 | 1.07 | -0.732 | 0.799 | 0.223 | |
| | 揚圧力 P_U 水深変化急 | 1.19 | | 0.868 | 0.243 | 1.22 | | 0.893 | 0.242 | 1.20 | | 0.882 | 0.235 | |
| | 潮位 wl | $r_{wl} = 1.5$ | 1.03 | -0.058 | 1.000 | 0.200 | 1.05 | -0.125 | 1.000 | 0.200 | 1.02 | -0.053 | 1.000 | 0.200 |
| | | $r_{wl} = 2.0 \sim 2.5$ | 1.05 | | 1.000 | 0.400 | 1.11 | | 1.000 | 0.400 | 1.04 | | 1.000 | 0.400 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - |
| | 自重 | W_{RC} 鉄筋コンクリート | 0.98 | 0.027 | 0.980 | 0.020 | - | - | 0.980 | 0.020 | 0.98 | 0.059 | 0.980 | 0.020 |
| | | W_{NC} 無筋コンクリート | 1.02 | 0.031 | 1.020 | 0.020 | 1.02 | 0.113 | 1.020 | 0.020 | 1.02 | 0.014 | 1.020 | 0.020 |
| | | W_{SAND} 中詰砂 | 1.01 | 0.128 | 1.020 | 0.040 | - | - | 1.020 | 0.040 | 1.01 | 0.135 | 1.020 | 0.040 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 転倒 | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.17 | -0.970 | 0.777 | 0.232 | 1.20 | -0.974 | 0.812 | 0.230 | 1.16 | -0.971 | 0.799 | 0.223 | |
| | 揚圧力 P_U 水深変化急 | 1.33 | | 0.868 | 0.243 | 1.34 | | 0.893 | 0.242 | 1.30 | | 0.882 | 0.235 | |
| | 潮位 wl | $r_{wl} = 1.5$ | 1.04 | -0.096 | 1.000 | 0.200 | 1.08 | -0.182 | 1.000 | 0.200 | 1.03 | -0.063 | 1.000 | 0.200 |
| | | $r_{wl} = 2.0 \sim 2.5$ | 1.09 | | 1.000 | 0.400 | 1.15 | | 1.000 | 0.400 | 1.05 | | 1.000 | 0.400 |
| | | H.H.W.L. | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - | 1.00 | | - | - |
| | 自重 | W_{RC} 鉄筋コンクリート | 0.98 | 0.045 | 0.980 | 0.020 | - | - | 0.980 | 0.020 | 0.97 | 0.124 | 0.980 | 0.020 |
| | | W_{NC} 無筋コンクリート | 1.02 | 0.049 | 1.020 | 0.020 | 1.01 | 0.172 | 1.020 | 0.020 | 1.02 | 0.015 | 1.020 | 0.020 |
| | | W_{SAND} 中詰砂 | 1.00 | 0.214 | 1.020 | 0.040 | - | - | 1.020 | 0.040 | 1.00 | 0.180 | 1.020 | 0.040 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | 支持力 | 水平波力 P_H 水深変化緩 | 1.13 | -0.872 | 0.777 | 0.232 | 1.15 | -0.856 | 0.812 | 0.230 | 1.12 | -0.852 | 0.799 | 0.223 |
| 水深変化急 | | 1.28 | 0.868 | | 0.243 | 1.28 | 0.893 | | 0.242 | 1.25 | 0.882 | | 0.235 | |
| 上載荷重 q | | 0.63 | 0.309 | 0.643 | 0.038 | 0.62 | 0.625 | 0.685 | 0.074 | 0.65 | -0.126 | 0.641 | 0.041 | |
| 上載荷重 載荷幅 $2b'$ | | 2.18 | - | - | - | 1.65 | - | - | - | 1.73 | - | - | - | |
| 分割片重量 w' | | 1.00 | 0.038 | 1.000 | 0.030 | 1.00 | 0.050 | 1.000 | 0.030 | 1.00 | 0.037 | 1.000 | 0.030 | |
| $\tan f'$ | | 0.96 | 0.325 | 1.000 | 0.060 | 0.95 | 0.324 | 1.000 | 0.070 | 0.96 | 0.350 | 1.000 | 0.060 | |
| 粘着力 c' | | 0.99 | 0.076 | 1.000 | 0.060 | 0.98 | 0.164 | 1.000 | 0.070 | 0.99 | 0.075 | 1.000 | 0.060 | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

※) 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

※) 水平波力・揚圧力, 上載荷重の確率分布 (B, V) は, 表-2および表-3をもとに算出した値

付録D 検討対象施設の設計条件・設計結果

表-D.1 ケーソン式混成堤

| No. | 設計波高 (H_D) m | 有義波高 ($H_{1/3}$) m | 周期 (T) s | 入射角 (β) ° | 海底勾配 — | 設計潮位 (wl) m | 摩擦係数 (f) — | 前面水深 (h) m | 設置水深 (h') m | 港外側 マウンド肩幅 (BM_1) m | 港内側 マウンド肩幅 (BM_2) m | 上部工 天端高 (C_T) m | 現行設計 堤体幅 ($B_{C_Current}$) m | レベル1設計 堤体幅 (B_{C_Level1}) m |
|-----|------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|
| 1 | 13.4 | 7.5 | 13.5 | 15 | 0.0077 | 0.5 | 0.75 | 21 | 16 | 10.6 | 12.5 | 5 | 22 | 22 |
| 2 | 16.68 | 9.4 | 14 | 10.3 | 0.01 | 0.5 | 0.75 | 21.5 | 17 | 12.6 | 9 | 6.5 | 26 | 26.3 |
| 3 | 14.05 | 9.8 | 14 | 0 | 0.009 | 0.5 | 0.75 | 17.5 | 13.5 | 11.5 | 7 | 6.4 | 24.5 | 26.8 |
| 4 | 12.5 | 7.1 | 13.5 | 0 | 0.008 | 0.7 | 0.6 | 21 | 16 | 12.5 | 27 | 5 | 22.95 | 24.75 |
| 5 | 6.73 | 3.74 | 14 | 20 | 0.005 | 0.5 | 0.6 | 13 | 8.5 | 9 | 6 | 4.5 | 11.5 | 12.1 |
| 6 | 13.07 | 8.5 | 13.5 | 25 | 0.013 | 0.5 | 0.75 | 16 | 13 | 7 | 13 | 6 | 19 | 19 |
| 7 | 14.3 | 8 | 13 | 7 | 0.014 | 1.5 | 0.6 | 22 | 16.5 | 8 | 7 | 6 | 23.45 | 25.3 |
| 8 | 14.3 | 8 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 27.5 | 18.5 | 33 | 43 | 6 | 20.55 | 22.45 |
| 9 | 13.3 | 7.4 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 26.5 | 16.5 | 28 | 33 | 6 | 20 | 21.5 |
| 10 | 13.3 | 7.4 | 11 | 0 | 0.023 | 0.4 | 0.6 | 14.7 | 12.5 | 13.5 | 11 | 5.5 | 21 | 22.7 |
| 11 | 14.36 | 8 | 14 | 7 | 0.002 | 1.4 | 0.6 | 23.2 | 16.5 | 10 | 7 | 6.2 | 25 | 27.45 |
| 12 | 6.4 | 3.5 | 13 | 23 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 12.7 | 9.5 | 10 | 9 | 5 | 9.75 | 10.35 |
| 13 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 2.8 | 7.65 | 8.5 |
| 14 | 5.94 | 3.3 | 7 | 5.5 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 2.8 | 7.75 | 8.55 |
| 15 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 2.8 | 7.7 | 8.5 |
| 16 | 9.6 | 5.5 | 12 | 12 | 0.009 | 1.6 | 0.6 | 13.1 | 10.5 | 12 | 6 | 5 | 18 | 19.25 |
| 17 | 13 | 8.4 | 12.5 | 0 | 0.01 | 1.3 | 0.75 | 18.5 | 13 | 15.8 | 9.5 | 6 | 19.3 | 19.65 |
| 18 | 13 | 8.4 | 13.5 | 0 | 0.02 | 3.5 | 0.6 | 13.5 | 10 | 15.5 | 9.5 | 8 | 22.75 | 24.85 |
| 19 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 14.5 | 12 | 11 | 14.09 | 5.5 | 19.6 | 20.35 |
| 20 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 15.6 | 12 | 15.6 | 8.9 | 5.5 | 20.2 | 20.65 |
| 21 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 17 | 13 | 15.6 | 9.5 | 5.5 | 19.3 | 19.75 |
| 22 | 8.64 | 4.8 | 10.8 | 30 | 0.01 | 1.67 | 0.6 | 12 | 9 | 7.5 | 4 | 4.5 | 15.9 | 17.55 |
| 23 | 4.95 | 2.8 | 5.9 | 30 | 0.005 | 2.2 | 0.6 | 17.2 | 10 | 6.5 | 5 | 4.8 | 5.5 | 5.5 |
| 24 | 4.1 | 2.3 | 7.5 | 43 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.6 | 9 | 11.1 | 12 | 3.5 | 5.4 | 5.35 |
| 25 | 4.5 | 2.5 | 7.6 | 42 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.2 | 9 | 7 | 5 | 3.5 | 6 | 5.95 |
| 26 | 6.6 | 3.7 | 14.8 | 0 | 0.01 | 3.1 | 0.6 | 13 | 9 | 8 | 6 | 5.5 | 13.45 | 14.1 |
| 27 | 7.5 | 5.1 | 11.1 | 38 | 0.01 | 1.3 | 0.6 | 8.6 | 6.5 | 5 | 5.43 | 9.2 | 12.25 | 12.85 |
| 28 | 12.7 | 7.7 | 13 | 0 | 0.003 | 1.5 | 0.6 | 17 | 14 | 9.6 | 6 | 6.5 | 23.7 | 25.6 |
| 29 | 5.3 | 2.9 | 11 | 43 | 0.02 | 0.4 | 0.6 | 6.6 | 5 | 9.4 | 6 | 3 | 7.75 | 8 |
| 30 | 10.5 | 5.8 | 11 | 15 | 0.01 | 0.4 | 0.6 | 18.7 | 13.5 | 13.65 | 19.6 | 4 | 18.95 | 20.25 |
| 31 | 10.6 | 6 | 15 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 14.1 | 10 | 13.2 | 5.7 | 6.5 | 19.45 | 21 |
| 32 | 10.8 | 6 | 8.7 | 25 | 0.0091 | 0.9 | 0.6 | 18.4 | 13 | 10.1 | 6.5 | 4.5 | 15.05 | 16.45 |
| 33 | 12 | 6 | 11.3 | 7 | 0.0167 | 0.9 | 0.75 | 18.5 | 12 | 9.6 | 6.5 | 4.5 | 19.3 | 20.6 |
| 34 | 5.4 | 3 | 7.3 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19 | 11 | 6 | 8 | 2.6 | 7.5 | 7.5 |
| 35 | 10.08 | 5.78 | 13 | 40 | 0.0346 | 1.42 | 0.75 | 12.1 | 9 | 10 | 10 | 4.9 | 14.2 | 16.95 |
| 36 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 4.2 | 9.8 | 10.15 |
| 37 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 4.2 | 9.8 | 10.15 |
| 38 | 4.21 | 2.34 | 4.7 | 14 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 7 | 5.5 | 5.6 | 5 | 5.45 |

※) 堤体幅 B_C : フーチング幅を含まないケーソン幅

表-D.2 消波ブロック被覆堤

| No. | 設計波高 (H_D) m | 有義波高 ($H_{1/3}$) m | 周期 (T) s | 入射角 (β) ° | 海底勾配 — | 設計潮位 (wl) m | 摩擦係数 (f) — | 前面水深 (h) m | 設置水深 (h') m | 港外側 マウント肩幅 (BM_1) m | 港内側 マウント肩幅 (BM_2) m | 上部工 天端高 (C_T) m | 現行設計 堤体幅 ($B_{C_Current}$) m | レベル1設計 堤体幅 (B_{C_Level1}) m |
|-----|------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|
| 1 | 9.1 | 5.3 | 12 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 11.5 | 8.5 | — | 7 | 4 | 11.9 | 11.45 |
| 2 | 8.60 | 5.3 | 12 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 10.5 | 8 | — | 7 | 4 | 11.3 | 10.85 |
| 3 | 8.7 | 5.8 | 12 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 10.5 | 8 | — | 7 | 4 | 11.5 | 11.05 |
| 4 | 12.85 | 7.9 | 13 | 54 | 0.011 | 0.5 | 0.75 | 16.5 | 12.5 | — | 9.4 | 7 | 12.3 | 11.55 |
| 5 | 12.40 | 7.5 | 12.5 | 52 | 0.011 | 0.5 | 0.6 | 15.5 | 11.5 | — | 9.4 | 6.5 | 12.45 | 11.95 |
| 6 | 7.50 | 4.2 | 13 | 0 | 0.007 | 1.5 | 0.6 | 12.3 | 7 | — | 9 | 4 | 10.15 | 9.75 |
| 7 | 12.8 | 7.1 | 13 | 13.5 | 0.005 | 1.5 | 0.75 | 16.5 | 11.5 | — | 7.5 | 5.8 | 16.45 | 14.65 |
| 8 | 12.7 | 7.2 | 13 | 28.5 | 0.005 | 1.5 | 0.6 | 15.3 | 11.5 | — | 6.5 | 5.7 | 16.85 | 16.15 |
| 9 | 11.2 | 6.3 | 13 | 20 | 0.002 | 1.5 | 0.6 | 19 | 13 | — | 6.5 | 5.3 | 15 | 14.5 |
| 10 | 9.96 | 6.01 | 14 | 0 | 0.004 | 1.33 | 0.6 | 12.6 | 9.5 | — | 9 | 5 | 11.95 | 11.45 |
| 11 | 8.4 | 4.8 | 12.5 | 14.6 | 0.033 | 1.1 | 0.6 | 14.5 | 10 | — | 5 | 3.6 | 9.8 | 9.5 |
| 12 | 7.5 | 4.9 | 10.5 | 8 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 10.6 | 7 | — | 5 | 3 | 8.85 | 8.5 |
| 13 | 11.3 | 8 | 12 | 0 | 0.009 | 3.6 | 0.75 | 11.5 | 8 | — | 9.5 | 7 | 13.2 | 12.05 |
| 14 | 5.7 | 3.5 | 7.4 | 0 | 0.01 | 4.4 | 0.6 | 7.2 | 4.5 | — | 6 | 5.7 | 6.5 | 6.1 |
| 15 | 11.6 | 8 | 12 | 0 | 0.01 | 3.6 | 0.75 | 11.5 | 8 | — | 11.5 | 7 | 13 | 11.9 |
| 16 | 11.6 | 8 | 12 | 0 | 0.01 | 3.6 | 0.75 | 13 | 8 | — | 9.5 | 7 | 13.5 | 12.3 |
| 17 | 12.4 | 9.5 | 16 | 0 | 0.006 | 2.1 | 0.6 | 13.4 | 9 | — | 14.5 | 7.6 | 14.7 | 14.05 |
| 18 | 15.5 | 9.4 | 17.4 | 35 | 0.01 | 2.2 | 0.6 | 21.1 | 12 | — | 32 | 8 | 16.65 | 15.9 |
| 19 | 12.7 | 8.1 | 12 | 3 | 0.02 | 1.5 | 0.6 | 15.7 | 13 | — | 5.7 | 6.4 | 16.5 | 15.65 |
| 20 | 8.2 | 4.8 | 11.5 | 58 | 0.01 | 0.4 | 0.6 | 11.3 | 9 | — | 6.3 | 3.2 | 9.75 | 9.2 |
| 21 | 9.3 | 5.7 | 12.1 | 40 | 0.01 | 1.2 | 0.6 | 12.1 | 10 | — | 5.1 | 5.8 | 13.3 | 12.8 |
| 22 | 9.8 | 5.9 | 11 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 14.2 | 11.5 | — | 5 | 4.1 | 13.55 | 13.5 |
| 23 | 11.5 | 7 | 11 | 0 | 0.02 | 0.4 | 0.6 | 16.3 | 12 | — | 5.8 | 4.6 | 14.5 | 14 |
| 24 | 7 | 5.4 | 10 | 0 | 0.01 | 0.3 | 0.6 | 8.4 | 5.5 | — | 6.5 | 5.2 | 6.5 | 6.1 |
| 25 | 6.4 | 4.9 | 13 | 25 | 0.01 | 0.3 | 0.6 | 6 | 4 | — | 5.2 | 4.5 | 10.4 | 9.85 |
| 26 | 8.7 | 5.9 | 12 | 9 | 0.01 | 0.3 | 0.6 | 11.3 | 6.5 | — | 7.2 | 5.1 | 9 | 8.6 |
| 27 | 3.7 | 2 | 11 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 5.3 | 3.5 | — | 2.5 | 2.3 | 4.3 | 4.25 |
| 28 | 11.63 | 7 | 14 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.75 | 14.5 | 10 | 9.4 | 6.5 | 6 | 13.6 | 12.2 |
| 29 | 8.8 | 5.2 | 12 | 15 | 0.0091 | 1.6 | 0.6 | 11.8 | 9.5 | 5 | 8.5 | 4.8 | 10.95 | 10.55 |
| 30 | 9.9 | 5.6 | 12 | 20 | 0.0091 | 1.6 | 0.6 | 12.8 | 10 | 7 | 9 | 5 | 12.6 | 11.6 |
| 31 | 6.6 | 3.7 | 13 | 34 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 10.5 | 7 | 19 | 10.5 | 4 | 7.65 | 7.4 |
| 32 | 10.02 | 5.83 | 13 | 0 | 0.002 | 1.7 | 0.6 | 12.1 | 9 | 23.9 | 10 | 5.2 | 14 | 14 |
| 33 | 11.51 | 7.36 | 15 | 15 | 0.002 | 1.4 | 0.6 | 14 | 10 | 8 | 7 | 6 | 15.85 | 13.4 |
| 34 | 20.09 | 12 | 16 | 0 | 0.001 | 3.5 | 0.75 | 17 | 8 | 14 | 10 | 7 | 24.1 | 22.35 |
| 35 | 14 | 10.5 | 16 | 2.5 | 0.01 | 3.5 | 0.75 | 14.2 | 10 | 17 | 10.5 | 7 | 18.55 | 17.5 |
| 36 | 10.8 | 6 | 16.5 | 0 | 0.01 | 3.5 | 0.75 | 17.2 | 12.5 | 31.5 | 10 | 6 | 13.9 | 13.9 |
| 37 | 4.39 | 2.44 | 5 | 0 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 7 | 5 | 19.3 | 3.5 | 5.6 | 5 | 4.8 |
| 38 | 4.39 | 2.44 | 5 | 0 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 19.3 | 4.5 | 5.6 | 5 | 5 |

※) 堤体幅 B_C : フーチング幅を含まないケーソン幅

表-D.3 上部斜面堤

| No. | 設計波高 (H_D) m | 有義波高 ($H_{1/3}$) m | 周期 (T) s | 入射角 (β) ° | 海底勾配 — | 設計潮位 (w) m | 摩擦係数 (f) — | 前面水深 (h) m | 設置水深 (h') m | 港外側 マウンド肩幅 (BM_1) m | 港内側 マウンド肩幅 (BM_2) m | 上部工 天端高 (C_T) m | 現行設計 堤体幅 ($B_{C_Current}$) m | レベル1設計 堤体幅 (B_{C_Level1}) m |
|-----|------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|
| 1 | 13.4 | 7.5 | 13.5 | 15 | 0.0077 | 0.5 | 0.75 | 21 | 16 | 10.6 | 12.5 | 8 | 14.55 | 12.95 |
| 2 | 16.68 | 9.4 | 14 | 10.3 | 0.01 | 0.5 | 0.75 | 21.5 | 17 | 12.6 | 9 | 9.9 | 18.55 | 15.8 |
| 3 | 14.05 | 9.8 | 14 | 0 | 0.009 | 0.5 | 0.75 | 17.5 | 13.5 | 11.5 | 7 | 10.3 | 17.65 | 14.6 |
| 4 | 12.5 | 7.1 | 13.5 | 0 | 0.008 | 0.7 | 0.6 | 21 | 16 | 12.5 | 27 | 7.8 | 13.05 | 14.85 |
| 5 | 6.73 | 3.74 | 14 | 20 | 0.005 | 0.5 | 0.6 | 13 | 8.5 | 9 | 6 | 4.24 | 9.4 | 10.65 |
| 6 | 13.07 | 8.5 | 13.5 | 25 | 0.013 | 0.5 | 0.75 | 16 | 13 | 7 | 13 | 9 | 12.55 | 11.7 |
| 7 | 14.3 | 8 | 13 | 7 | 0.014 | 1.5 | 0.6 | 22 | 16.5 | 8 | 7 | 9.5 | 16.05 | 17.5 |
| 8 | 14.3 | 8 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 27.5 | 18.5 | 33 | 43 | 9.4 | 21.85 | 24.45 |
| 9 | 13.3 | 7.4 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 26.5 | 16.5 | 28 | 33 | 8.8 | 27.15 | 30.4 |
| 10 | 13.3 | 7.4 | 11 | 0 | 0.023 | 0.4 | 0.6 | 14.7 | 12.5 | 13.5 | 11 | 7.8 | 10.7 | 12.4 |
| 11 | 14.36 | 8 | 14 | 7 | 0.002 | 1.4 | 0.6 | 23.2 | 16.5 | 10 | 7 | 9.4 | 21.15 | 24.05 |
| 12 | 6.4 | 3.5 | 13 | 23 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 12.7 | 9.5 | 10 | 9 | 5 | 8.7 | 9.8 |
| 13 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 4.1 | 5.35 | 5.3 |
| 14 | 5.94 | 3.3 | 7 | 5.5 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 4.1 | 5.45 | 5.35 |
| 15 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 4.1 | 5.35 | 5.3 |
| 16 | 9.6 | 5.5 | 12 | 12 | 0.009 | 1.6 | 0.6 | 13.1 | 10.5 | 12 | 6 | 7.1 | 12.1 | 13.9 |
| 17 | 13 | 8.4 | 12.5 | 0 | 0.01 | 1.3 | 0.75 | 18.5 | 13 | 15.8 | 9.5 | 9.7 | 13.85 | 12.25 |
| 18 | 13 | 8.4 | 13.5 | 0 | 0.02 | 3.5 | 0.6 | 13.5 | 10 | 15.5 | 9.5 | 11.9 | 14.6 | 17.1 |
| 19 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 14.5 | 12 | 11 | 14.09 | 9.4 | 13.2 | 11.85 |
| 20 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 15.6 | 12 | 15.6 | 8.9 | 9.4 | 14.9 | 12.65 |
| 21 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 17 | 13 | 15.6 | 9.5 | 9.4 | 14.35 | 12.65 |
| 22 | 8.64 | 4.8 | 10.8 | 30 | 0.01 | 1.67 | 0.6 | 12 | 9 | 7.5 | 4 | 6.47 | 8.1 | 9.25 |
| 23 | 4.95 | 2.8 | 5.9 | 30 | 0.005 | 2.2 | 0.6 | 17.2 | 10 | 6.5 | 5 | 5 | 3.65 | 3.6 |
| 24 | 4.1 | 2.3 | 7.5 | 43 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.6 | 9 | 11.1 | 12 | 4.4 | 3.45 | 3.4 |
| 25 | 4.5 | 2.5 | 7.6 | 42 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.2 | 9 | 7 | 5 | 4.6 | 3.8 | 3.75 |
| 26 | 6.6 | 3.7 | 14.8 | 0 | 0.01 | 3.1 | 0.6 | 13 | 9 | 8 | 6 | 6.8 | 10.7 | 12 |
| 27 | 7.5 | 5.1 | 11.1 | 38 | 0.01 | 1.3 | 0.6 | 8.6 | 6.5 | 5 | 5.43 | 6.4 | 6.6 | 7.1 |
| 28 | 12.7 | 7.7 | 13 | 0 | 0.003 | 1.5 | 0.6 | 17 | 14 | 9.6 | 6 | 9.2 | 14.7 | 14.55 |
| 29 | 5.3 | 2.9 | 11 | 43 | 0.02 | 0.4 | 0.6 | 6.6 | 5 | 9.4 | 6 | 3.3 | 5.35 | 5.8 |
| 30 | 10.5 | 5.8 | 11 | 15 | 0.01 | 0.4 | 0.6 | 18.7 | 13.5 | 13.65 | 19.6 | 6.2 | 9.75 | 11.15 |
| 31 | 10.6 | 6 | 15 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 14.1 | 10 | 13.2 | 5.7 | 7.5 | 18.1 | 20.9 |
| 32 | 10.8 | 6 | 8.7 | 25 | 0.0091 | 0.9 | 0.6 | 18.4 | 13 | 10.1 | 6.5 | 6.9 | 7.7 | 7.6 |
| 33 | 12 | 6 | 11.3 | 7 | 0.0167 | 0.9 | 0.75 | 18.5 | 12 | 9.6 | 6.5 | 6.9 | 11 | 10.9 |
| 34 | 5.4 | 3 | 7.3 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19 | 11 | 6 | 8 | 3.8 | 5.1 | 5.05 |
| 35 | 10.08 | 5.78 | 13 | 40 | 0.0346 | 1.42 | 0.75 | 12.1 | 9 | 10 | 10 | 7.2 | 8.85 | 10.6 |
| 36 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 6.04 | 6.55 | 7.05 |
| 37 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 6.04 | 6.55 | 7.05 |
| 38 | 4.21 | 2.34 | 4.7 | 14 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 7 | 5.5 | 6.39 | 3.6 | 3.55 |

※) 堤体幅 B_C : フーチング幅を含まないケーソン幅

※) 検討ケースは全てケーソン式混成堤の設計条件を適用した。

表-D.4 直立消波ブロック堤

| No. | 設計波高 (H_D) m | 有義波高 ($H_{1/3}$) m | 周期 (T) s | 入射角 (β) ° | 海底勾配 — | 設計潮位 (w) m | 摩擦係数 (f) — | 前面水深 (h) m | 設置水深 (h') m | 港外側 マウンド肩幅 (BM_1) m | 港内側 マウンド肩幅 (BM_2) m | 上部工 天端高 (C_T) m | 現行設計 堤体幅 ($B_{C,Current}$) m | レベル1設計 堤体幅 ($B_{C,Level1}$) m |
|-----|------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---|--|
| 1 | 5.7 | 3.5 | 7.4 | 0 | 0.01 | 4.4 | 0.6 | 7.2 | 4.5 | 8 | 6 | 7.9 | 7.8 | 8.3 |
| 2 | 3.7 | 2 | 11 | 0 | 0.01 | 0.5 | 0.6 | 5.3 | 3.5 | 4 | 2.5 | 2.5 | 7.6 | 8.3 |
| 3 | 5.3 | 2.9 | 11 | 0 | 0.02 | 0.4 | 0.6 | 6.6 | 5 | 9.4 | 6 | 3.3 | 11.15 | 12.15 |
| 4 | 6.6 | 3.7 | 13 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 10.5 | 7 | 19 | 10.5 | 5.2 | 13.95 | 15.15 |
| 5 | 4.39 | 2.44 | 5 | 0 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 7 | 5 | 19.3 | 3.5 | 6.49 | 5.75 | 5.8 |
| 6 | 4.39 | 2.44 | 5 | 0 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 19.3 | 4.5 | 6.49 | 6.3 | 6.35 |
| 7 | 4.21 | 2.34 | 4.7 | 0 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 7 | 5.5 | 6.39 | 6.15 | 6.2 |
| 8 | 2.7 | 1.5 | 7 | 0 | 0.01 | 2 | 0.6 | 6 | 4 | 3 | 2 | 3.5 | 5.25 | 4.55 |
| 9 | 2.3 | 1.3 | 7 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 5 | 3.5 | 2 | 2 | 3.2 | 5.35 | 5 |
| 10 | 2.9 | 1.6 | 1 | 0 | 0.01 | 0.3 | 0.6 | 6 | 4.5 | 5.5 | 1.5 | 1.6 | 7.05 | 7.1 |
| 11 | 2.0 | 1.1 | 9.2 | 0 | 0.05 | 0.5 | 0.6 | 4.2 | 4.2 | 0 | 0 | 2.25 | 3.9 | 4.3 |
| 12 | 4.5 | 2.5 | 6.8 | 0 | 0.02 | 1.2 | 0.6 | 7.5 | 4.5 | 2.5 | 4.5 | 4.3 | 8.35 | 9.15 |
| 13 | 3.4 | 1.9 | 5 | 0 | 0.0167 | 0.72 | 0.6 | 5 | 3 | 2 | 1.5 | 2.2 | 5.35 | 5.05 |
| 14 | 3.6 | 2 | 11 | 0 | 0.0057 | 1.5 | 0.6 | 3 | 1.5 | 3 | 2 | 3 | 9 | 10.05 |
| 15 | 4.3 | 2.4 | 11 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 3.4 | 2 | 3.6 | 2.3 | 3.5 | 10.15 | 11.25 |
| 16 | 3.4 | 1.9 | 11 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 3.1 | 3.1 | 0 | 0 | 4 | 7.55 | 8.25 |
| 17 | 2.5 | 1.4 | 12 | 0 | 0.004 | 1.5 | 0.6 | 5 | 5 | 0 | 3 | 2.7 | 6.2 | 6 |
| 18 | 4.5 | 2.5 | 6 | 0 | 0.01 | 2.07 | 0.6 | 12 | 7.2 | 5.2 | 5.2 | 3.5 | 6.4 | 6.4 |
| 19 | 0.77 | 0.43 | 18 | 0 | 0.02 | 1.7 | 0.6 | 3 | 1.7 | 2 | 2 | 2.6 | 2.05 | 2.05 |
| 20 | 1.89 | 1.05 | 11 | 0 | 0.01 | 2.21 | 0.6 | 5.5 | 5 | 1.5 | 2 | 3.1 | 5.2 | 4.65 |
| 21 | 5.0 | 2.8 | 6.5 | 0 | 0.01 | 4.09 | 0.6 | 3.2 | 1.6 | 3 | 2 | 5.8 | 10.75 | 11.65 |
| 22 | 4.05 | 2.25 | 6 | 0 | 0.01 | 4.3 | 0.6 | 3.3 | 1.8 | 3 | 2 | 5.6 | 7.7 | 7.9 |
| 23 | 1.4 | 0.8 | 3.5 | 0 | 0.01 | 0.92 | 0.6 | 5 | 2.96 | 2 | 1.5 | 1.5 | 2.23 | 2.23 |
| 24 | 1.8 | 1 | 4.4 | 0 | 0.02 | 3.6 | 0.6 | 2.5 | 0.4 | 2 | 2 | 4.1 | 2.55 | 2.55 |
| 25 | 2.7 | 1.5 | 4.7 | 0 | 0.1 | 4.44 | 0.6 | 3 | 3 | 0 | 0 | 5.3 | 4.2 | 4.5 |
| 26 | 1.6 | 0.9 | 4.8 | 0 | 0.0333 | 3.06 | 0.6 | 4 | 2.5 | 3 | 3 | 3.5 | 2.9 | 3.05 |
| 27 | 2.2 | 1.2 | 4 | 0 | 0.01 | 2.14 | 0.6 | 4.5 | 3.43 | 2 | 3 | 3.3 | 3.15 | 3.15 |
| 28 | 5.2 | 2.9 | 10.7 | 0 | 0.025 | 3.6 | 0.6 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2 | 6 | 9.6 | 9.9 |
| 29 | 2.7 | 1.5 | 9.5 | 0 | 0.01 | 1.4 | 0.6 | 11.5 | 3.6 | 3 | 2 | 3 | 5.5 | 5.95 |
| 30 | 2.0 | 1.1 | 9.5 | 0 | 0.02 | 1.4 | 0.6 | 14 | 6.7 | 3 | 3 | 2.6 | 2.75 | 2.75 |
| 31 | 2.7 | 1.5 | 7.5 | 0 | 0.01 | 3.3 | 0.6 | 12.5 | 6.5 | 3 | 3 | 5 | 4.45 | 4.45 |
| 32 | 3.6 | 2 | 7.1 | 0 | 0.01 | 3.3 | 0.6 | 12.4 | 4.8 | 2.8 | 3 | 5 | 5.4 | 5.4 |
| 33 | 3.1 | 1.7 | 5.4 | 0 | 0.0059 | 1.2 | 0.6 | 9.5 | 7 | 2.5 | 2.5 | 3 | 5.8 | 4.75 |
| 34 | 1.4 | 0.8 | 3.5 | 0 | 0.01 | 3.5 | 0.6 | 2 | 2.5 | 2 | 2 | 4 | 2.5 | 2.45 |
| 35 | 3.1 | 1.7 | 5.4 | 0 | 0.004 | 1.2 | 0.6 | 9 | 8 | 5 | 3.5 | 2.6 | 4.75 | 4.75 |
| 36 | 2.65 | 1.47 | 4.9 | 0 | 0.002 | 4.08 | 0.6 | 1 | 2 | 3 | 2 | 5.6 | 4.1 | 3.9 |
| 37 | 1.8 | 1 | 6 | 0 | 0.01 | 4.8 | 0.6 | 3 | 3.5 | 2 | 2 | 6 | 3.5 | 3.55 |
| 38 | 2.3 | 1.3 | 4.4 | 0 | 0.05 | 3.4 | 0.6 | 13 | 5.5 | 3 | 3 | 4 | 3.95 | 4.2 |
| 39 | 4.1 | 2.3 | 5.3 | 0 | 0.0125 | 3.8 | 0.6 | 4.6 | 3.1 | 2 | 3.3 | 4.6 | 5.65 | 6.05 |
| 40 | 2.5 | 1.4 | 4.5 | 0 | 0.05 | 3.1 | 0.6 | 11 | 3.8 | 5 | 3 | 3.5 | 3.9 | 4.15 |

※) 堤体幅 B_C : フーチング幅を含まないケーソン幅

※) 検討ケース1~7は、浅水域におけるケーソン式混成堤の設計条件を適用した。

表-D.5 消波ケーソン堤

| No. | 設計波高 (H_D) m | 有義波高 ($H_{1/3}$) m | 周期 (T) s | 入射角 (β) ° | 海底勾配 — | 設計潮位 (w_l) m | 摩擦係数 (f) — | 前面水深 (h) m | 設置水深 (h') m | 港外側 マウント肩幅 (BM_1) m | 港内側 マウント肩幅 (BM_2) m | 上部工 天端高 (C_T) m | 現行設計 堤体幅 ($B_{C_Current}$) m | レベル設計 堤体幅 (B_{C_Level}) m |
|-----|------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|---|
| 1 | 6.7 | 3.7 | 7.7 | 0 | 0.01 | 3.6 | 0.6 | 8.6 | 6 | 4 | 4 | 6 | 12.9 | 11.35 |
| 2 | 13.4 | 7.5 | 13.5 | 15 | 0.0077 | 0.5 | 0.75 | 21 | 16 | 10.6 | 12.5 | 5.25 | 24.45 | 22.35 |
| 3 | 16.68 | 9.4 | 14 | 10.3 | 0.01 | 0.5 | 0.75 | 21.5 | 17 | 12.6 | 9 | 6.5 | 29.1 | 26.35 |
| 4 | 14.05 | 9.8 | 14 | 0 | 0.009 | 0.5 | 0.75 | 17.5 | 13.5 | 11.5 | 7 | 6.4 | 28.95 | 26.95 |
| 5 | 12.5 | 7.1 | 13.5 | 0 | 0.008 | 0.7 | 0.6 | 21 | 16 | 12.5 | 27 | 5.25 | 23.2 | 24.45 |
| 6 | 6.73 | 3.74 | 14 | 20 | 0.005 | 0.5 | 0.6 | 13 | 8.5 | 9 | 6 | 4.5 | 16.2 | 17 |
| 7 | 13.07 | 8.5 | 13.5 | 25 | 0.013 | 0.5 | 0.75 | 16 | 13 | 7 | 13 | 6 | 22.35 | 21.45 |
| 8 | 14.3 | 8 | 13 | 7 | 0.014 | 1.5 | 0.6 | 22 | 16.5 | 8 | 7 | 6.5 | 24.4 | 25.35 |
| 9 | 14.3 | 8 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 27.5 | 18.5 | 33 | 43 | 6.4 | 24 | 24.95 |
| 10 | 13.3 | 7.4 | 13 | 0 | 0.005 | 1.4 | 0.6 | 26.5 | 16.5 | 28 | 33 | 6.1 | 25.05 | 26.35 |
| 11 | 13.3 | 7.4 | 11 | 0 | 0.023 | 0.4 | 0.6 | 14.7 | 12.5 | 13.5 | 11 | 5.5 | 22.75 | 24 |
| 12 | 14.36 | 8 | 14 | 7 | 0.002 | 1.4 | 0.6 | 23.2 | 16.5 | 10 | 7 | 6.4 | 28.65 | 29.4 |
| 13 | 6.4 | 3.5 | 13 | 23 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 12.7 | 9.5 | 10 | 9 | 5 | 13.95 | 14.6 |
| 14 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 3.45 | 9.85 | 9.25 |
| 15 | 5.94 | 3.3 | 7 | 5.5 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 3.45 | 10 | 9.3 |
| 16 | 5.9 | 3.3 | 7 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19.5 | 10.7 | 6.5 | 8 | 3.45 | 9.2 | 9.2 |
| 17 | 9.6 | 5.5 | 12 | 12 | 0.009 | 1.6 | 0.6 | 13.1 | 10.5 | 12 | 6 | 5.35 | 20.7 | 21.9 |
| 18 | 13 | 8.4 | 12.5 | 0 | 0.01 | 1.3 | 0.75 | 18.5 | 13 | 15.8 | 9.5 | 6 | 24.95 | 22.45 |
| 19 | 13 | 8.4 | 13.5 | 0 | 0.02 | 3.5 | 0.6 | 13.5 | 10 | 15.5 | 9.5 | 8 | 26.7 | 28.2 |
| 20 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 14.5 | 12 | 11 | 14.09 | 5.75 | 23.05 | 23.15 |
| 21 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 15.6 | 12 | 15.6 | 8.9 | 5.75 | 25.25 | 23.8 |
| 22 | 13.05 | 8.5 | 14 | 0 | 0.01 | 0.9 | 0.75 | 17 | 13 | 15.6 | 9.5 | 5.75 | 24.45 | 22.95 |
| 23 | 8.64 | 4.8 | 10.8 | 30 | 0.01 | 1.67 | 0.6 | 12 | 9 | 7.5 | 4 | 5.07 | 15.5 | 16.4 |
| 24 | 4.95 | 2.8 | 5.9 | 30 | 0.005 | 2.2 | 0.6 | 17.2 | 10 | 6.5 | 5 | 4.8 | 7.05 | 7.05 |
| 25 | 4.1 | 2.3 | 7.5 | 43 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.6 | 9 | 11.1 | 12 | 3.85 | 7.05 | 7.05 |
| 26 | 4.5 | 2.5 | 7.6 | 42 | 0.004 | 2.1 | 0.6 | 12.2 | 9 | 7 | 5 | 3.95 | 7.45 | 7.45 |
| 27 | 6.6 | 3.7 | 14.8 | 0 | 0.01 | 3.1 | 0.6 | 13 | 9 | 8 | 6 | 5.5 | 14.6 | 15.3 |
| 28 | 7.5 | 5.1 | 11.1 | 38 | 0.01 | 1.3 | 0.6 | 8.6 | 6.5 | 5 | 5.43 | 4.85 | 13.35 | 14.1 |
| 29 | 12.7 | 7.7 | 13 | 0 | 0.003 | 1.5 | 0.6 | 17 | 14 | 9.6 | 6 | 6.5 | 22.4 | 22.95 |
| 30 | 5.3 | 2.9 | 11 | 43 | 0.02 | 0.4 | 0.6 | 6.6 | 5 | 9.4 | 6 | 3 | 10.15 | 10.75 |
| 31 | 10.5 | 5.8 | 11 | 15 | 0.01 | 0.4 | 0.6 | 18.7 | 13.5 | 13.65 | 19.6 | 4.3 | 18.95 | 20.05 |
| 32 | 10.6 | 6 | 15 | 0 | 0.01 | 1.5 | 0.6 | 14.1 | 10 | 13.2 | 5.7 | 6.5 | 23.9 | 25.25 |
| 33 | 10.8 | 6 | 8.7 | 25 | 0.0091 | 0.9 | 0.6 | 18.4 | 13 | 10.1 | 6.5 | 4.5 | 14.4 | 14.65 |
| 34 | 12 | 6 | 11.3 | 7 | 0.0167 | 0.9 | 0.75 | 18.5 | 12 | 9.6 | 6.5 | 4.5 | 21 | 22.2 |
| 35 | 5.4 | 3 | 7.3 | 0 | 0.01 | 0.8 | 0.6 | 19 | 11 | 6 | 8 | 3.3 | 9.15 | 9.15 |
| 36 | 10.08 | 5.78 | 13 | 40 | 0.0346 | 1.42 | 0.75 | 12.1 | 9 | 10 | 10 | 5.31 | 17.1 | 19.25 |
| 37 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 4.69 | 12.9 | 13.55 |
| 38 | 8.02 | 4.71 | 13 | 59 | 0.0033 | 1.33 | 0.6 | 10 | 7.5 | 8 | 5.5 | 4.69 | 12.9 | 13.55 |
| 39 | 4.21 | 2.34 | 4.7 | 14 | 0.01 | 4.05 | 0.6 | 15 | 7 | 7 | 5.5 | 6.22 | 5.9 | 5.9 |

※) 堤体幅 B_C : フーチング幅を含まないケーソン幅 (ただし、遊水部の幅含む)

※) 検討ケース2~38は、ケーソン式混成堤の設計条件を適用した。これらについて、遊水部の設計に用いる消波対象波の波高は、ケース1の消波対象波高と安定照査対象波高 (50年確率有義波高) の比をもとに設定した。また、消波対象波の波長については、各ケースの波形勾配一定の条件より設定した。

付録E 各種波力算定式

(1) ケーソン式混成堤, 消波ブロック被覆堤, 直立消波ブロック堤: 合田式 (合田, 1973)

直立壁前面に作用する波圧および底面に作用する揚圧力は, 次式によって算定される。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_D \quad (\text{E.1})$$

$$p_1 = 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha^* \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D \quad (\text{E.2})$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (\text{E.3})$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (\text{E.4})$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_0 g H_D \quad (\text{E.5})$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right)^2 \quad (\text{E.6})$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_D}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right\} \quad (\text{E.7})$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\} \quad (\text{E.8})$$

$$\alpha^* = \max \{ \alpha_2, \alpha_1 \} \quad (\text{E.9})$$

ここで,

η^* : 静水面上波圧強度が0となる高さ(m)

p_1 : 静水面における波圧強度(kN/m²)

p_2 : 海底面における波圧強度(kN/m²)

p_3 : 直立壁底面における波圧強度(kN/m²)

p_u : 揚圧力算定のための前踵における波圧強度(kN/m²)

h : 直立壁前面における水深(m)

h_b : 直立壁前面から沖側へ有義波高の5倍だけ離れた地点での水深(m)

h' : 直立壁底面の水深(m)

d : 根固め工又はマウンド被覆工天端のいずれか浅い方の水深(m)

ρ_0 : 海水の密度(通常は 1030kg/m³)

g : 重力加速度(9.8m/s²)

H_D : 設計計算に用いる波高(m)

L : 水深 h における波長(m)

$\max\{a, b\}$: a 又は b のいずれか大きい値

$\min\{a, b\}$: a 又は b のいずれか小さい値

β : 直立壁法線の垂線と波の主方向から±15°の範囲で最も危険な方向となす角度(°)

λ_1, λ_2 : 波圧の補正係数(標準は 1.0)

λ_3 : 揚圧力の補正係数(標準は 1.0)

α_1 : 合田式において重複波的波力成分を表すパラメータ

α_2 : 合田式において, マウンド高さや海底勾配の影響等による衝撃的波力成分を表わすパラメータ

α_3 : 前面波圧強度が p_1 と p_2 の間で直線的に変化すると仮定していることから導かれるパラメータ

式(E.9)中の α_1 は高橋ら(1992)が提案した合田式に衝撃波の影響を考慮するためのパラメータ(衝撃碎波力係数)であり, 次式による。

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0 & : \alpha_{11} \leq 0 \\ \alpha_{10} \alpha_{11} & : \alpha_{11} > 0 \end{cases} \quad (\text{E.10})$$

ここで,

α_{10} : 波高の影響を表わすパラメータ

α_{11} : マウンド形状の影響を表わすパラメータ

であり, 式(E.11)~式(E.16)で算定する。

$$\alpha_{10} = \begin{cases} \frac{H_D}{d} & : \frac{H_D}{d} \leq 2 \\ 2.0 & : \frac{H_D}{d} > 2 \end{cases} \quad (\text{E.11})$$

$$\alpha_{11} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & : \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 \sqrt{\cosh \delta_2}} & : \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (\text{E.12})$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20\delta_{11} & : \delta_{11} \leq 0 \\ 15\delta_{11} & : \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (\text{E.13})$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9\delta_{22} & : \delta_{22} \leq 0 \\ 3.0\delta_{22} & : \delta_{22} > 0 \end{cases} \quad (\text{E.14})$$

$$\delta_{11} = 0.93 \left(\frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.36 \left(\frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (\text{E.15})$$

$$\delta_{22} = -0.36 \left(\frac{B_M}{L} - 0.12 \right) + 0.93 \left(\frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (\text{E.16})$$

ここで,

B_M : マウンド前肩幅(m)

ケーソン式混成堤に対する波圧の補正係数 λ は、標準値1.0とする。直立消波ブロック堤については、 $\lambda_1 = \lambda_3 = 1.0$, $\lambda_2 = 0$ としてよい。消波ブロック被覆堤については、消波ブロックを十分に被覆した場合に、 $\lambda_2 = 0$ とし、は、次式によって算定する(高橋ら, 1990)

$$\lambda_1 = \lambda_3 = \begin{cases} 1.0 & : H_D/h \leq 0.3 \\ 1.2 - 2(H_D/h)/3 & : 0.3 < H_D/h \leq 0.6 \\ 0.8 & : H_D/h > 0.6 \end{cases} \quad (E.17)$$

なお、消波ブロック被覆堤が一般に用いられる砕波帯では、上式から、 $\lambda_1 = \lambda_3 = 0.8$ となる。

(2) 上部斜面堤(森平ら, 1979; 細山田ら, 1994)

上部斜面堤に作用する水平波力 P_H および鉛直下向き波力 P_V は、次式によって算定される。

$$P_H = \lambda_V P_1 + \lambda_{SL}' P_2 \sin^2 \theta \quad (E.18)$$

$$P_V = \frac{1}{2} \lambda_{SL}' P_2 \sin 2\theta \quad (E.19)$$

ここで、

P_1 : 合田式で計算される上部斜面堤の直立壁に作用する波力(kN/m)

P_2 : 合田式で計算される上部斜面堤の斜面を直立面に投影した面積に作用する波力(kN/m)

θ : 斜面部の勾配($^\circ$)

λ_V , λ_{SL}' : 波力低減係数であり、次式によって算定される。

$$\lambda_V = \min[1.0, \max\{1.1, 1.1 + 11d_c/L\} - 5.0H_D/L] \quad (E.20)$$

$$\lambda_{SL}' = \min\left[\max\{1.0, -23H/L \tan^{-2}\theta + 0.46 \tan^{-2}\theta + \sin^{-2}\theta\}, \sin^{-2}\theta\right] \quad (E.21)$$

ここで、

d_c : 静水面部から斜面部下端までの高さ(m)

(3) 消波ケーソン堤(高橋ら, 1991)

直立消波ケーソンの設計においては、以下に示す6つの位相を考慮する必要がある。

- ① 押し波時Ⅰ : スリット部の波力が最大となる位相
- ② 押し波時Ⅱa : 遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現われる位相
- ③ 押し波時Ⅱb : 遊水室後壁に比較的ゆるやかに変化する波力のピークが現われる位相
- ④ 引き波時Ⅰ : スリット部の波力が負のピークとなる位相
- ⑤ 引き波時Ⅱ : ケーソン前面の水位が最も低下する位相
- ⑥ 引き波時Ⅲ : 遊水室内の水位が最も低下する位相

ここでは、外的安定上問題となる押し波の波力算定法のみを示す。消波スリットケーソンの各部に作用する波力は、合田式による水平波圧および揚圧力の算定において、表-E.1に示す波圧の補正係数 λ_1 , λ_2 を用いる(ここでは、揚圧力の補正係数 λ_3 を λ_1 と表記している)。

表-E.1 押し波時における波圧の補正係数

| | | 押し波時 I | 押し波時 II a | 押し波時 II b |
|------|----------------|---|--|--|
| スリット | λ_{S1} | 0.85 | 0.7 | 0.3 |
| | λ_{S2} | 0.4 ($\alpha^* \leq 0.75$) 0.3/ α^* ($\alpha^* > 0.75$) | 0 | 0 |
| 前面 | λ_{L1} | 1.0 | 0.75 | 0.65 |
| | λ_{L2} | 0.4 ($\alpha^* \leq 0.5$) 0.2/ α^* ($\alpha^* > 0.5$) | 0 | 0 |
| 後壁 | λ_{R1} | 0 | $20\ell/3L'$ ($\ell/L' \leq 0.15$) 1.0 ($\ell/L' > 0.15$) | 1.4 ($H_D/h \leq 0.1$) $1.6 - 2H_D/h$ ($0.1 < H_D/h < 0.3$) 1.0 ($H_D/h \geq 0.3$) |
| | λ_{R2} | 0 | * 0.56 ($\alpha^* \leq 25/28$) 0.5/ α^* ($\alpha^* > 25/28$) | 0 |
| 下床版 | λ_{M1} | 0 | $20\ell/3L'$ ($\ell/L' \leq 0.15$) 1.0 ($\ell/L' > 0.15$) | 1.4 ($H_D/h \leq 0.1$) $1.6 - 2H_D/h$ ($0.1 < H_D/h < 0.3$) 1.0 ($H_D/h \geq 0.3$) |
| | λ_{M2} | 0 | 0 | 0 |
| 揚圧力 | λ_{U1} | 1.0 | 0.75 | 0.65 |
| | λ_{U2} | 0 | 0 | 0 |

* λ_{R2} に対する α^* の計算では、 α_l の代わりに α_l' を用いる。すなわち、 $d \rightarrow d'$ 、 $L \rightarrow L'$ 、 $B_M \rightarrow B_M'$ に置き換えて計算する。ここに、 d' : 遊水室下端深さ、 L' : 前面水深 d における波長、 $B_M' = \ell - (d - d')$ 、 ℓ : 遊水室幅である。