

安全係数を用いた防波堤滑動量算定手法の構築に関する検討

赤石沢総光*・長 船 徹**・興野俊也***・阿部光信**

性能設計体系において防波堤の滑動破壊に対しては、モンテカルロシミュレーションによる信頼性設計手法が考案されている。本研究では、より簡便な設計手法の構築を目指し、性能マトリックス活用を前提に直立ケーソン堤の滑動破壊に着目した確定論的な設計法について検討を行った。その結果、モンテカルロシミュレーションによる確率論的手法を基にした確定的な滑動量算定手法を提案し、沖波波高による fragility 曲線を用いることによって、波浪レベルと性能レベルに対応した目標信頼度の設定の考え方、ならびに重要度を考慮した安全係数設定手法について示した。

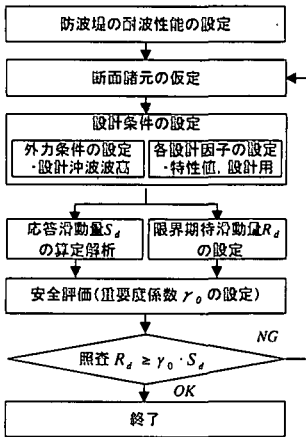
1. はじめに

性能設計体系が浸透するにつれ、防波堤設計は従来の破壊安全率による方法から変形量に基づくものへと移行しつつある。従来設計による安全率は直接的に性能とは結びつかないため、よりわかりやすい工学指標である変形量を用いて安全照査を行うのが性能設計の基本に則った考え方である。特に防波堤の滑動破壊に対してはモンテカルロシミュレーション（以降「MCS」と呼ぶ）をベースとした設計手法が下迫ら（1998）、興野ら（2000）によって考案されており、確率論的な設計体系はすでに構築されている。しかし実務においては、すべての設計段階で確率論的設計法を用いることは合理的ではない。耐震設計分野では多段階性能設計が主流であり、性能マトリックスによる確定論的な限界状態設計体系をとっている。これは実務設計の中で複雑な信頼性解析等を行う必要がなく、設計技術者にとっては簡便かつ実務的でなじみやすい。

そこで本研究は、性能マトリックスの活用を前提に直立ケーソン堤の滑動破壊に着目し、MCS による確率論的手法を基にした確定的な滑動量算定手法、fragility 曲線を用いることによって波浪レベルと性能レベルに対応した目標信頼度の設定の考え方、ならびに重要度を考慮した安全係数設定手法について報告する。なお本検討では堤体設置水深を 20 m とし、設計は耐波性能ごとに図一に示す設計手順に基づき行うものとする。

2. 確定的な滑動量算定手法について

確定論的な限界状態設計を行うためには、各設計因子の特性値と設計用値を設定し、滑動量算定解析により設計に用いる堤体の滑動量（「応答滑動量」と呼ぶ）を求める必要がある。なお興野ら（2000）による確率論的設計法では、耐用期間中に来襲する波浪に対して滑動量を算定していたが、本検討における確定論的設計法では設計



図一 確定論的な性能設計手順

確率波を対象とした。ここでは特性値、設計用値の設定と滑動量算定解析法の考え方について述べる。

(1) 特性値と設計用値の設定

算定される応答滑動量は滑動量の期待値とし、MCS から求まる期待滑動量と比較して、特性値および設計用値について検討した。表一に考慮すべき設計因子と統計特性、特性値および設計用値算定用の安全係数 γ_d を示す。

特性値については、従来設計で用いる設計条件を踏襲した。また、設計用値の設定にあたっては、各設計因子に対して特性値そのものを用いて滑動量算定解析を行ったところ、設置水深 20 m の場合、いくつかの堤体幅に対して算定された応答滑動量は後述する MCS から求まる

表一 各設計因子の統計特許・特性値・安全係数

設計因子 /	分布形	平均的値	変動係数	特性値 μ	安全係数 γ_d
波設変形係数	正規	0.00	0.10	計算値	1.00
波力算定係数	"	0.00	0.10	計算値	1.10
水位	"	0.00	0.415	HWL	1.00
摩擦係数	"	0.00	0.10	0.60	1.11
時化継続時間	"	$\sigma: 0.84^b$		計算値 ^a	1.00
有義波周期	"	$\sigma: 2.00^b$		14 s	1.00
コンクリート単体重量	ばらつき考慮しない			24.0 kN/m ³	1.00
中砂単体重量	ばらつき考慮しない			20.0 kN/m ³	1.00

注1) ここでは標準偏差 σ を直接与えるものとする。
注2) 時化モデルを考え、計算値 = $14.6H_p - 58.4$ (h) ここに H_p : 時化のピーク波高 (m) とする。

* 正会員 工務 東京電力(株)技術開発研究所建設技術グループ
** 正会員 東電設計(株)第二土木本部港湾・海岸部
*** 正会員 東京電力(株)技術開発研究所建設技術グループ

滑動量期待値と比べて非常に小さい値となった。そこで滑動量に対する感度分析の結果から、設計条件のうち摩擦係数と波力算定誤差の影響度が同程度に高いことを考慮して、これらの設計用値については安全側に設定することとした。(表-1 参照)

設計用値の算定式は(1)式のとおりであり、本検討では設計用値から計算される応答滑動量は期待滑動量と位置づけた。

摩擦係数, 自重: $f_d = f_k / \gamma_d$

その他: $f_d = \gamma_d \cdot f_k$ (1)

ここで, f_d : 設計用値, f_k : 特性値, γ_d : 設計用値算定のための安全係数を表す。

(2) 応答滑動量の算定解析

解析から求まる応答滑動量は, MCS から求まる滑動量の確率分布を実現現象としての滑動量のばらつきと捉えたときの期待滑動量とし, 解析には堤体滑動時の運動方程式に基づく谷本ら(1996)の滑動量算定モデルを用いた。

しかし, 運動方程式から求まる滑動量は波高1波あたりのものであり, 実際の堤体はある時化に対して滑動すると考えられる。そこで, 1時化に対する応答滑動量の算定解析手法について検討した。このとき阿部ら(1999)が提案している時化モデルを適用した。なお, 設計沖波波高は設計者が決める確定値とし, 表-1に示した各設計因子の不確定性を考慮して MCS を実施した。

1時化に対する応答滑動量の算定にあたっては, 1時化に含まれる波数を考える必要がある。図-2に示すように時化モデルは, 波高の経時変化をピーク波高を頂点とする三角形分布でモデル化したものであり, 継続時間2時間の波群の集合体として表わされる。各波群における波高の出現度数分布はレーリー分布に従うと仮定し, 波高階級ごとに波数を算定, 波高階級ごとに求まる1波あたりの滑動量にその階級の波数を掛け合わせて算出した滑動量を全階級分合算することにより, 1時化の滑動量を算定することとした。その算定式を(2)式に示す。

$$S_d = \sum_i \left(\sum_j n_{ij} \right) \cdot S_i(f_d) \quad \text{..... (2)}$$

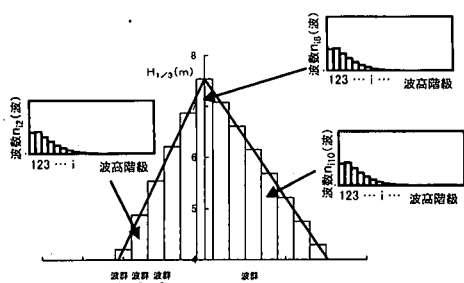


図-2 時化モデルによる応答滑動量算概念図

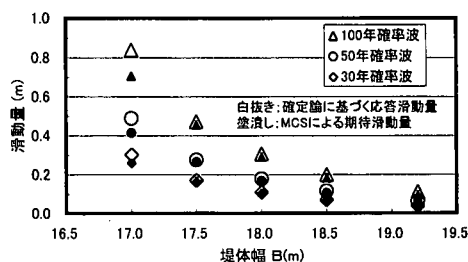


図-3 応答滑動量と MCS による期待滑動量との比較 (設置水深 20 m)

ここで, S_d : 設計用の応答滑動量, n_{ij} : 波高階級 i における j 番目の波群中の波数, $S_i(f_d)$: 各設計用値を用いた波高階級 i に対する滑動量である。

設置水深 20 m において, 3つの設計沖波波高に対して(2)式で計算される応答滑動量と MCS による期待滑動量との比較を行った結果, 図-3のようになった。このとき波高階級は1mピッチとした。これより適切に特性値と設計用値を設定することで, 想定されうる堤体幅に対して確定的に応答滑動量を算定できる見通しが得られた。

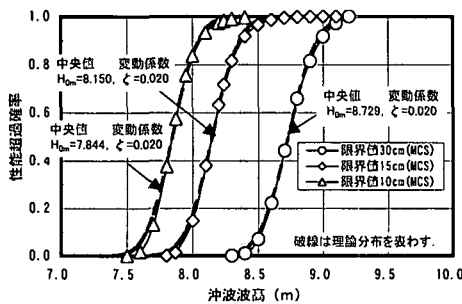
なお, (2)式により算定される応答滑動量には, 耐用年数という概念は含まれていない。本検討では, 後述する目標信頼度についてはそれに基づく安全係数の中でこれを考慮することとした。

3. 目標信頼度及びそれに基づく安全係数設定の考え方

通常, 性能マトリックスは, 確定論的な設計フレームの中で活用されるため, 設定した外力レベルおよび性能レベルの組合せに対して, 確率的にどれほどの安全裕度が確保されているかは明確になっていない。このことは性能マトリックス活用上の欠点の一つと言える。このため本検討では, 各性能レベルでの安全裕度を確率的に評価し目標信頼度に基づき安全係数を設定する考え方を提案した。その際に, 堤体の滑動抵抗力の不確定性を表す fragility 曲線を活用することを試みた。なお目標信頼度としては信頼性指標を用いることとした。またこれ以降, 目標信頼度に基づく安全係数を重要度係数と呼ぶ。

(1) フラジリティ曲線の構築

フラジリティ曲線とは, 横軸に沖波波高を, 縦軸に滑動量を基にした性能超過の確率をプロットした曲線であり, 防波堤の滑動抵抗力の不確定性を表す。フラジリティ曲線の構築にあたっては, 適切な工学指標を用い, その具体的な限界値を設定する必要がある。工学指標としては, 下迫ら(1998)が期待滑動量に基づく設計法を提案していること, また MCS で十分な繰返し計算(本検討で



図一 対数正規型の fragility 曲線の例 (設置水深 20 m, 堤体幅 18.0 m)

は 2000 回) を行えば中心極限定理により確率変数としての滑動量期待値は正規分布に近似でき、数学的扱いが簡便になること等を考慮し、本検討でも期待滑動量を用いることとした。これより各耐波性能に対応して、期待滑動量の限界値 (「限界期待滑動量」と呼ぶ) を設定した。

fragility 曲線 $Fr(x)$ は (3) 式に示されるように、堤体幅 B 、限界期待滑動量 R 、水深 h に依存するため、これら条件を設定したうえで沖波波高 x に対応した性能超過確率 (期待滑動量 S が限界期待滑動量 R を超える確率) を算定することにより描くことができる。

$$Fr(x) = P[S > R | x = H_0; B, R, h] \quad \dots\dots (3)$$

期待滑動量の確率密度関数が正規分布で表される場合、これらの条件に関係なく fragility 曲線は、図一に示すように対数正規分布で近似できることがわかった。

fragility 曲線が対数正規分布で近似できると、この確率分布形状は、沖波波高の中央値 (「中央波高耐力」と呼ぶ) と変動係数により決定することができ、その関数形は (4) 式のように表せる。

$$Fr(x) = \int_0^{H_0} \frac{1}{\sqrt{2}\xi \cdot x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln H_{0m}}{\xi}\right)^2\right] dx \\ = \Phi\left(\frac{\ln H_0 - \ln H_{0m}}{\xi}\right) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 H_{0m} : 損傷確率 0.5 の時の沖波波高 (中央波高耐力)、 ξ : fragility 曲線を表す確率密度関数の変動係数、 Φ : 標準正規分布の累積分布関数である。

なお fragility 曲線の変動係数を算定するためには期待滑動量の変動係数を設定する必要があるが、現段階では設定が困難である。このため、本検討における期待滑動量の変動係数 V_s は耐震設計分野における地震外力による fragility 曲線を参考に一律 0.20 と仮定した。

表一 P_f と β との関係

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1.3	2.3	3.1	3.7	4.2	4.7	5.2

(2) 条件付目標信頼性指標の算定

性能関数が正規確率変数であるとき性能超過確率 P_f と信頼性指標 β の関係は (5) 式で表される。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad \dots\dots (5)$$

(5) 式より、 P_f と β との対応は表一2 のようになる。

そして、(4) 式と (5) 式から信頼性指標は (6) 式となる。

$$\beta = \frac{\ln H_{0m} - \ln H_0}{\xi} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 H_0 : 設計沖波波高である。設計で目指すべき目標断面を設定し、その断面から目標とする中央波高耐力 H_{0m} を算定できれば、(6) 式より設計沖波波高と変動係数から目標信頼性指標 β を設定できる。これは、設計波高レベル H_0 と $\beta=0.0$ の波高レベル H_{0m} との差を安全裕度として捉えたものと考えられる。また設計波高レベルの発生確率は考慮されていないことから、(6) 式は条件付目標信頼性指標を与えることとなる。

なお、設計で目指す目標断面は従来設計との整合を考えたコードキャリブレーションが主流であるが、設計の合理化を志向する場合にはライフサイクルコスト (「LCC」と呼ぶ) 最小化基準を用いるのがよいと考えられる。この場合、耐用期間中の総コストを考えるため、LCC 最小化基準から求まる目標断面および目標信頼性指標は耐用年数を考慮したものとなり、これは重要度係数に反映されることとなる。

(3) 重要度係数の設定

本検討では、信頼性理論に基づき重要度係数を設定することとした。重要度係数を算定するためには、性能関数を設定しなくてはならない。ここでは、設計沖波波高が付与された条件付きの性能関数 Z として (7) 式を用いることとした。

$$Z = R - S \quad \dots\dots (7)$$

ただし、期待滑動量 S のみ正規確率変数とし限界期待滑動量 R は確定値とした。このとき (7) 式に対する信頼性指標 β は (8) 式のように表わすことができる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{R - \mu_S}{\sigma_S} \quad \dots\dots (8)$$

ここで μ_Z : Z の平均値、 σ_Z : Z の標準偏差、 μ_S : 期待滑動量 S の平均値、 σ_S : 期待滑動量 S の標準偏差とする。

目標信頼性指標を β_t とすると、設計では (9) 式を満足するように断面設定を行うこととなる。

$$\beta \geq \beta_t \quad \dots\dots (9)$$

そこで、(9) 式に (8) 式を代入すると、(10) 式が得られる。

$$R \geq (1 + \beta_t \cdot V_s) \cdot \mu_S \quad \dots\dots (10)$$

(10) 式は、滑動量をベースとした性能照査式の原形であり、これを (11) 式のように書き換えると、設計上の

性能照査式および安全係数となる。

$$R_d \geq \gamma_0 \cdot S_d, \quad \gamma_0 = 1 + \beta_c \cdot V_s \cdots \cdots (11)$$

ここで、 R_d :設計用の限界期待滑動量、 S_d :設計用の応答滑動量、 γ_0 :重要度係数、 V_s :期待滑動量 S の変動係数とする。

上記に示すように本検討では、設計用値算定のための安全係数 γ_d を除き、一つの安全係数 (重要度係数 γ_0) のみを設定することとした。鉄筋コンクリート構造物の設計によく用いられるコンクリート標準示方書・構造性能照査編 (2002) では、確定論的な限界状態設計法をベースとしており、その中で5種類の部分安全係数 (材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数) を設定することを基本としている。しかし、各々の安全係数の全体安全裕度に対する寄与度が明確でなく、また各々の安全係数値を信頼性理論から導出することはできず、防波堤の滑動に対する設計について実際にどの程度の安全係数値が妥当か現段階では不明である。このため、本検討では設計の簡便さを重視し、信頼性理論による最も基本的な安全係数の設定法を用いることとした。しかしその反面、目標信頼性指標に対するばらつき度合いも大きくなることが想定され、今後安全係数のより合理的な設定法についても検討していく必要がある。

4. 目標信頼度と重要度係数の具体的な設定方法

上記までの検討結果に基づき、耐用年数 50 年、水深 20 m に設置された直立ケーソン堤を対象に、性能マトリックスを活用した場合の条件付目標信頼性指標と重要度係数の設定に関するケーススタディを行った。

ここでは、表-3 に示す波浪レベルと耐波性能の組合せに基づき検討した。なお、設定した波浪レベルおよび各耐波性能に対する限界期待滑動量は、性能設計に関するこれまでの著者らの研究実績および Takahashi ら (2001) の考え方を参考に設定した。各耐波性能に対する fragility 曲線は図-4 に示すように与えられているものとする。

そこで最初に、設計において目標とすべき堤体幅を決める必要がある。目標断面は堤体の重要度と密接に関係し、重要度の高い堤体ほど目標断面を大きく設定すべきであることから、目標断面の違いは重要度の違いと捉え

表-3 検討に用いた性能マトリックス

設計波浪レベル	耐波性能 1 R_{d1} 10 cm	耐波性能 2 R_{d2} 15 cm	耐波性能 3 R_{d3} 30 cm
L1 (30 年確率波)	○	—	—
L2 (50 年確率波)	—	○	—
L3 (100 年確率波)	—	—	○

R_{di} ($i=1, 2, 3$) は各耐波性能の限界期待滑動量を表す。

表-4 目標信頼性指標と重要度係数の設定例

設計波浪レベル		目標信頼度			重要度係数 γ
レベル	沖波波高	目標断面 B_t	中央波高耐力 H_{0ms}	目標信頼性指標 β_t	
L1	7.87 m	18.5 m	8.24 m	2.27	1.45
L2	8.24 m		8.44 m	1.17	1.23
L3	8.70 m		9.04 m	1.89	1.38
L1	7.87 m	19.2 m	8.77 m	5.44	2.09
L2	8.24 m		8.97 m	4.27	1.85
L3	8.70 m		9.57 m	4.79	1.96

表-5 性能マトリックスにおける重要度評価例 1

設計波浪レベル	耐波性能 1 ($R_{d1}=10$ cm)	耐波性能 2 ($R_{d2}=15$ cm)	耐波性能 3 ($R_{d3}=30$ cm)
L1 (30 年確率波)	○重要度「中」 ($\beta_t=2.27, \gamma_0=1.45$) ◎重要度「高」 ($\beta_t=5.44, \gamma_0=2.09$)	—	—
L2 (50 年確率波)	—	○重要度「中」 ($\beta_t=1.27, \gamma_0=1.23$) ◎重要度「高」 ($\beta_t=4.27, \gamma_0=1.85$)	—
L3 (100 年確率波)	—	—	○重要度「中」 ($\beta_t=1.89, \gamma_0=1.38$) ◎重要度「高」 ($\beta_t=4.79, \gamma_0=1.96$)

ることもできる。

LCC に関する興野ら (2000) の検討結果を参考に、設計上の目標断面の一つとして 18.5 m とした。これは重要度としては中程度と位置づけてよい。また重要度の高い堤体の目標断面としては従来の破壊安全率による設計から求まる 19.2 m を用いることとした。

滑動抵抗力の代表値である中央波高耐力は、主に堤体幅、限界期待滑動量、堤体設置水深に依存する。堤体設置水深を固定とした場合、中央波高耐力は目標断面と限界期待滑動量の線形的な関数で表現でき、各目標断面に対応して (12) 式より推定できることがわかった。

$$H_{om} = 0.77B + 0.04R_d - 6.41 \cdots \cdots (12)$$

なお中央波高耐力および堤体幅の単位は m、限界期待滑動量の単位は cm である。また fragility 曲線の変動係数 ξ は水深固定の場合、 V_s を 0.20 と仮定すると、若干のばらつきはあるものの堤体幅および限界期待滑動量に関わりなく同程度であることから一律 0.02 とした。

また重要度係数 γ_0 については (11) 式に基づき算定した。

以上の条件のもとで、各耐波性能に対する目標信頼性指標および重要度係数は表-4 のようになる。なお、各波浪レベルに対する沖波波高は、極値統計解析に基づき各再現期間に対応して算出した。

また、表-4 を性能マトリックスで表示すると表-5 のようになる。ここでは、堤体の重要度を重要度係数の違いに直接反映しており、照査する波浪レベルと性能レベルの組合せは重要度に関係なく同じにしている。

また目標とする信頼度が決まれば、重要度に応じた目標断面を設定することも可能である。目標信頼度は表-2

表-6 目標信頼度を満足する目標断面の設定例

重要度	設計波浪レベル		性能レベル	β_i	中央波高耐力 H_{0mi}	目標断面 B_i
	レベル	沖波波高 H_0				
高	L1	7.87 m	—	—	—	—
	L2	8.24 m	耐波性能 1	3.0	8.75 m	19.2 m
	L3	8.70 m	耐波性能 2	3.0	9.24 m	19.5 m
中	L1	7.87 m	耐波性能 1	3.0	8.36 m	18.7 m
	L2	8.24 m	耐波性能 2	3.0	8.75 m	18.9 m
	L3	8.70 m	耐波性能 3	3.0	9.24 m	18.8 m
低	L1	7.87 m	耐波性能 2	3.0	8.36 m	18.4 m
	L2	8.24 m	耐波性能 3	3.0	8.75 m	18.1 m
	L3	8.70 m	—	—	—	—

表-7 性能マトリックスにおける重要度評価例 2
($\beta_i = 3.0$ の場合)

	耐波性能 1 ($R_d=10\text{cm}$)	耐波性能 2 ($R_d=15\text{cm}$)	耐波性能 3 ($R_d=30\text{cm}$)
L 1 (30 年確率波)	○ 18.7m	△ 18.4m	—
L 2 (50 年確率波)	◎ 19.2m	○ 18.9m	△ 18.1m
L 3 (100 年確率波)	—	◎ 19.5m	○ 18.8m

◎-◎: 重要度「高」, ○-○: 重要度「中」, △-△: 重要度「低」

を参考に、設備の所有者や管理者が確保したい安全裕度に応じて任意に設定することができるものである。表-3に示すように、波浪レベルと耐波性能レベルは既に与えられているものとして、例えば外力と性能のどの組合せに対しても満足すべき目標信頼性指標を 3.0 とすると、(6) 式を変形した (13) 式から必要な中央波高耐力が求まる。

$$H_{0mi} = \exp[\beta_i \cdot \zeta + \ln H_0] \quad \dots\dots\dots (13)$$

これにより、所定の目標信頼度を満足するための目標断面は (12) 式を用いて表-6 のように推定できる。ここでは重要度の違いは波浪レベルと性能レベルの組合せの違いとして反映しており、このため重要度係数は (11) 式より一律 1.60 となる。表-7 はこれらを性能マトリックスで表わしたもので、表中の数値は目標断面を表わす。

なお実際の設計では、考慮したすべての耐波性能を満足するように断面を決めることとなる。例えば重要度が中程度の堤体(表-7 中の○印)では、耐波性能 2 の目標断面である 18.9 m を設定すれば、耐波性能 1 および耐波性能 3 を満足する設計となる。よって、各外力と性能における目標断面の差が小さい方が合理的といえ、またそうなるように限界期待滑動量や設計波浪レベルを検討することもできるであろう。

以上、(6) 式に示すように性能に関わる中央波高耐力、外力に関わる沖波波高および安全裕度に関わる信頼性指標との関係を構築することによって、性能マトリックスを活用したバランスのとれた性能設計が実現可能と考えられる。

5. 結 論

本検討では、水深 20 m に設置された直立ケーソン堤の滑動破壊モードに着目し滑動量に基づく確定的な限界状態設計法の構築に向けて検討を試みた。主な結論は下記のとおりでである。

①安全(重要度)係数を用いた堤体の滑動量算定解析手法の考え方について提案した。この中で、設計上必要な特性値および設計用値の設定の考え方および時化モデルを用いた滑動量算定解析の方法について提示した。

②性能マトリックスの活用を前提に、沖波波高によるフラジリティ曲線を用いることによって、波浪レベルと性能レベルに対応した目標信頼度の設定の考え方を提示した。

③性能マトリックス活用により重要度の違いを考慮した安全(重要度)係数および目標断面の設定事例を示した。

以上のような方法により、性能マトリックス活用による多段階滑動設計と信頼性設計の融合を図ることが可能と考えられる。

ただし、解決すべき課題も多く、実質的に安全係数を一つのみとし簡便性を重視したため目標信頼度に対するばらつきも大きくなることが想定される。このため、重要な設計条件である堤体設置水深の違いに対する詳細検討や試設計も含めて検討する必要がある。何よりも本検討では滑動破壊モードのみを対象としているが、実際の変形量に基づく設計を行うには沈下破壊モードに対する検討が欠かせない。半没水上部斜面堤等の異なる構造形式に対する検討も必要となってくるであろう。

今後は、上記の課題に対しても検討を重ね、性能設計に則った変形量による限界状態設計法の構築を目指していきたい。

参 考 文 献

- 阿部光信・興野俊也・長船 徹・貝沼憲男 (1999): 防波堤の信頼性設計法における時化のモデル化について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 916-920.
- 興野俊也・赤石沢純光・阿部光信・長船 徹 (2000): 性能設計活用による防波堤の設計合理化について, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 816-820.
- 土木学会 (2002): コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp. 15-17.
- 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, 港空研報告, 第 37 巻, 第 3 号, pp. 1-30.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 846-850.
- Takahashi, S, K. Shimosako, and M. Hanzawa (2001): Performance design for maritime structures and its application to vertical breakwaters-caisson sliding and deformation-based reliability design, Advanced Design of Maritime Structures in the 21st Century (ADMS 21), pp. 63-73.