

重力式防波堤の外的安定に関する部分係数の コードキャリブレーション

CODE CALIBRATION OF PARTIAL FACTORS FOR STABILITY OF GRAVITY-TYPE BREAKWATERS

吉岡 健¹・長尾 毅²

Takeshi YOSHIOKA, Takashi NAGAO

¹正会員 修(工) 電源開発(株) (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

²正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Level-1 reliability-based design method (partial factor design method) is recommended for standard structural design method. This study conducts the code calibration of partial factors for stability against sliding, overturning, foundation failure of gravity-type breakwaters (five structural types: caisson-type composite breakwaters, breakwaters covered with wave-dissipating blocks, three gravity-type special breakwaters). Setting the current mean safety levels as target values and using sensitivity factors, we decided the appropriate values of partial factors. Moreover, we showed that the established level-1 design method enables more reasonable design than current method.

Key Words, gravity-type breakwater, code calibration, partial factor, reliability index

1. はじめに

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、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、設計に介在する様々な不確実性を考慮し、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り、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) の中でも明確に位置づけられている。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)は、今後の標準設計法としてその導入が期待されている¹⁾。レベル1設計法を構築するためには、目標安全性水準の適切な設定が必要となるが、その最も有力な方法の1つは、現行設計法が担保する平均安全性水準を統計的に定め、これを目標値として部分係数を決定する、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(滑動、転倒、支持力)に着目すると、先に長尾²⁾は、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、現行設計法の平均安全性水準を定めている。さらに著者ら³⁾は、近年、実用化が目覚ましい3形式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)について、同じく現行設計法の平均安全性水準を定めた。本研究は、

これら5形式の重力式防波堤を対象とし、その外的安定に関する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設計法を構築するものである。

2. 目標安全性水準

まず、先に定めた目標安全性水準の決定結果について概説する。詳細は、文献2), 3)を参照されたい。信頼性解析は、表-1に示す各設計因子の従う確率分布をもとに、滑動、転倒、支持力破壊に対して、破壊点周りのテーラー展開に基づく1次信頼性理論(FORM)によって、信頼性指標 β を評価した。検討対象は構造形式毎に40ケース程度とし、現行の港湾基準⁴⁾によって定めた設計断面に対して、それぞれ β を算出した。さらに、本問題は複数破壊モードの和事象であるため、各破壊モードの β を併せたシステム破壊確率もしくはシステム信頼性指標として現行設計法の安全性水準を評価した。

表-2に、システム信頼性指標の算出結果を示す。ここで、ケーソン式混成堤、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、ケーソン式混成堤、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

表-1 設計因子の従う確率分布⁵⁾

	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
波力算定式推定精度		
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
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
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_b, w')		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04
基礎地盤	1.00	0.03
基礎地盤強度 ($c', \tan \phi'$)	1.00	0.10

注) B : 平均値の偏り (平均値/特性値)

V : 変動係数

 r_{wl} : 既往最高潮位とさく望平均満潮位の比

表-2 システム信頼性指標

構造形式	平均値		標準偏差	
ケーソン式混成堤	2.38	2.11	0.30	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を、目標システム破壊確率に換算すると、それぞれ、ケーソン式混成堤、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} 、消波ケーソン堤が 2.0×10^{-2} となる。

3. キャリブレーション方法

レベル1設計法における部分係数は、各設計因子の特性値に乘じることによって、破壊点(設計点)における値に変換する係数であり、確率変数 X の部分係数 γ_X は次式によって算出される。

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

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

感度係数とは、次式に示すとおり、性能関数 Z の線形化近似係数であり、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である。これは、構造物の安全性に各設計因子が及ぼす影響度を表す。

$$\alpha_X = \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)_{X^*} \cdot \frac{\sigma_X}{\sigma_Z} = - \left(\frac{X^* - u_X}{\sigma_X} \right) / \beta \quad (2)$$

ここに、 X^* : 確率変数 X の破壊点における値、 u : 平均値、 σ : 標準偏差

各設計因子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

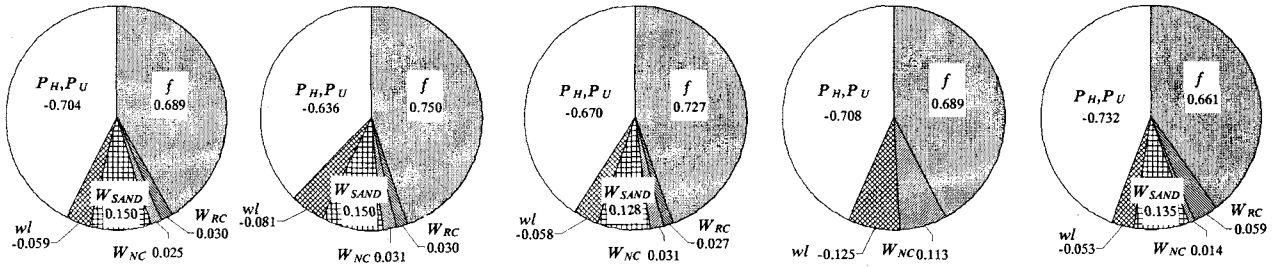
目標信頼性指標については、考慮する事象が単一の破壊モードである場合には、現行設計法が担保する平均信頼性指標がそのまま目標値となる。しかしながら、本問題のような直列システムの場合には、表-2に示したシステム信頼性指標の平均値 $\beta_{T_{sys}}$ をそのまま目標値 β_T とすることは適切ではないと考えられる。なぜなら、仮に各モードの信頼性指標が $\beta_{T_{sys}}$ を満足するように設計したとしても、設計結果が保有するシステム信頼性指標は、必ず $\beta_{T_{sys}}$ を下回るからである。そこで本研究では、FORMにより $\beta_{T_{sys}}$ 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(1)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

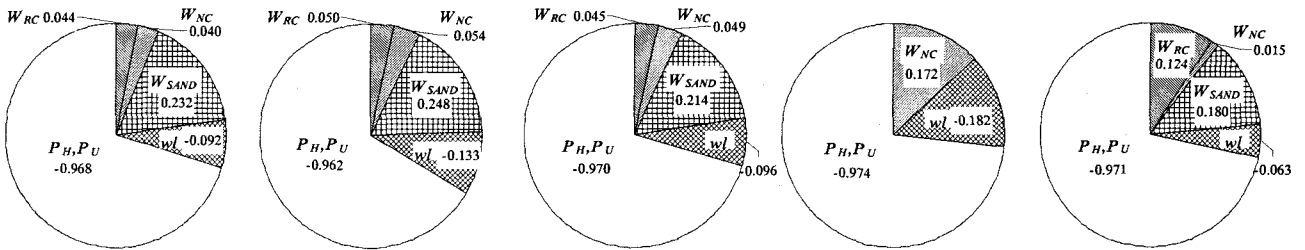
感度係数は、式(2)に示すように各設計因子が信頼性指標に及ぼす影響度を表す係数であるから、信頼性指標が変化すると、断面の変化によって各設計因子の特性値が変化するため、結果、感度係数も変化する⁵⁾。そこで、本研究では、各破壊モード別に β_T をちょうど満足する断面をまず決定し、その断面における感度係数を全事例について平均した値を用いることとした。これにより、感度係数のばらつきは低減されるとともに、目標破壊確率との分散の小さい合理的な部分係数を得ることができると考えられる。

図-1は、この方法によって算出した感度係数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。ここで、同一因子の感度係数を破壊モード別に比較

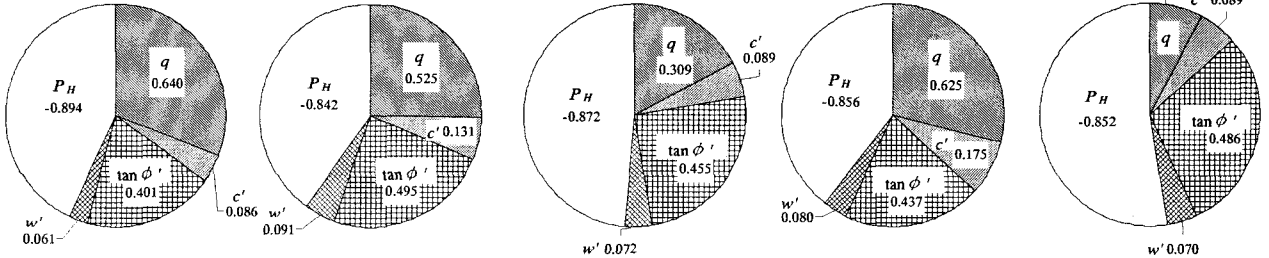
(滑動)



(転倒)



(支持力)



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-1 感度係数分布 (全事例平均)

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、感度係数が単に各設計因子のばらつきの程度だけではなく、性能関数に依存して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-1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。

4. レベル1信頼性設計法の構築

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-1)、感度係数 (図-1) を用い、式(1)によって算出した部分係数を表-3に示す。さらに、レベル1設計法の安全性照査式を以下に示す。

(滑動)

$$\gamma_f f_k \left(\sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - P_{Bd} - \gamma_{P_U} P_{Uk} \right) \geq \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (3)$$

(転倒)

$$a_1 \sum_i \gamma_{W_i} W_{ik} - a_2 P_{Bd} - a_3 \gamma_{P_U} P_{Uk} \geq a_4 \gamma_{P_H} P_{Hk} \quad (4)$$

(支持力)

$$\begin{aligned} & \sum \left\{ \left[\gamma_c c'_k s + (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k \right] \right. \\ & \times \frac{\sec \theta}{1 + \tan \theta \gamma_{\tan \phi'} \tan \phi'_k / F_f} \left. \right\} \\ & / \gamma_a \left\{ \sum (\gamma_w w'_k + \gamma_q q_k) \sin \theta + a_5 \gamma_{P_H} P_{Hk} / r \right\} \\ & \geq F_f = 1.0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{Bd} = \rho_w g (\gamma_w w'_k + h) B_C \quad (6)$$

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 (°)、

表-3 部分係数の提案

γ		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	1.07
		水深変化 急	1.17	1.01	1.19	1.20
	wl	$r_{wl}=1.5$	1.03	1.04	1.03	1.02
		$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.06	1.08	1.05	1.04
		H.H.W.L.	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	1.16
		水深変化 急	1.31	1.14	1.33	1.30
	wl	$r_{wl}=1.5$	1.04	1.06	1.04	1.03
		$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.09	1.13	1.09	1.05
		H.H.W.L.	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	1.12
		水深変化 急	1.26	1.09	1.28	1.25
	q		0.55	0.34	0.63	0.65
	$2b'$	上載荷重載荷幅	1.89	3.25	2.18	1.73
	W'		1.00	1.00	1.00	1.00
	$\tan \phi'$		0.96	0.95	0.96	0.96
	c'		0.99	0.99	0.99	0.99
	a	構造解析係数	1.00	1.00	1.00	0.76

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 ($^\circ$), r : すべり円弧の半径 (m), γ : 添字の設計因子に対する部分係数, F_f : 補助パラメータ, 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)

式中の添字 k, d は, それぞれ特性値および設計用値を表し, また式(6)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(4)における補助パラメータ F_f は, すべり円上の抵抗モーメントが起動モーメントを上回ることを, 簡易ビショップ法の収束計算によって確認するための係数である. 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-1 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, 直立消波ブロック堤や消波ケーソン堤の支持力安全性照査については, 簡易ビショップ法による照査式自体に内在する安全性を考慮するため, 構造解析係数に相当する係数 γ_a を導入した.

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_T とレベル 1 設計結果が保有するシステム破壊確率 $P_{R1,i}$ の分散が最小となる案を最適案として採用する.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_T - P_{R1,i})^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

式(1)に用いる β_T を変化させた場合の式(7)による判定結果を図-2 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

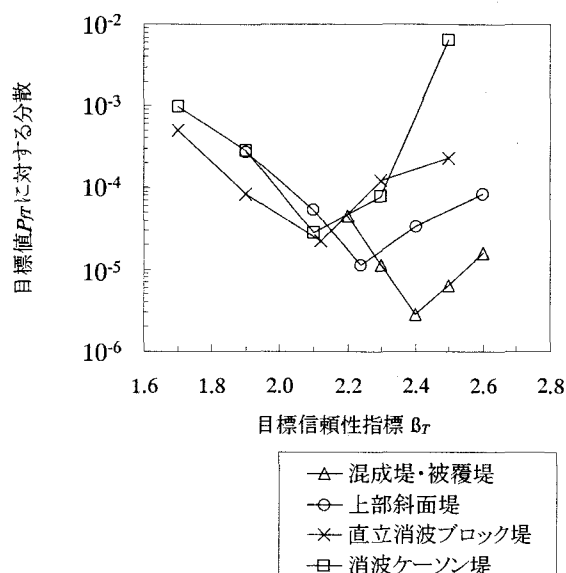
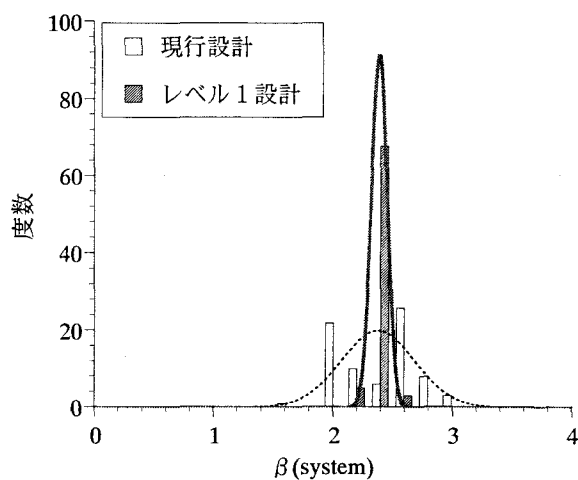


図-2 最適案の判定

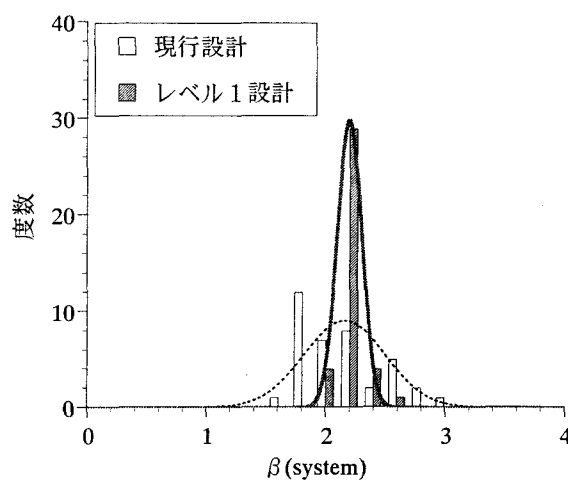
ーションが適切になされていると判断できる。

図-3 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-4 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、ケーソ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%、消波ケーソン堤が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。

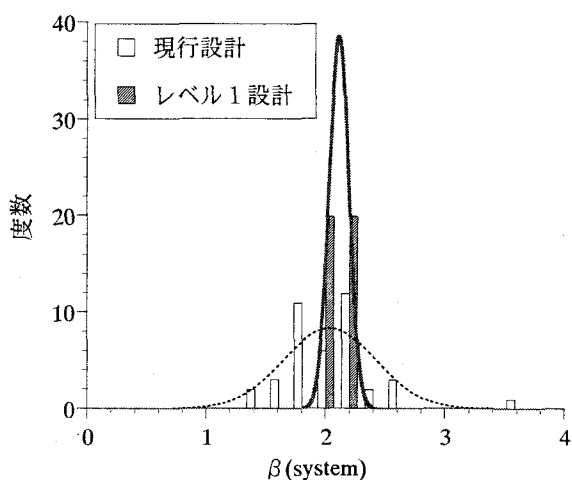
以上のことから、今回構築したレベル1 設計法によって、平均的な建設コストは従来どおりとしたまま、過度に安全もしくは過度に危険な施設が減少し、合理的な設計が可能となる。



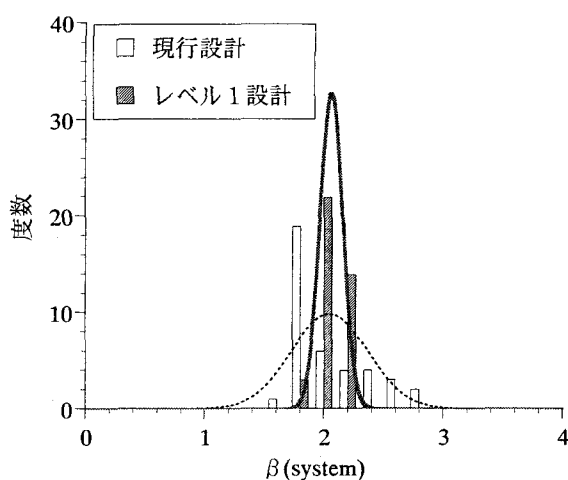
a) ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤



b) 上部斜面堤

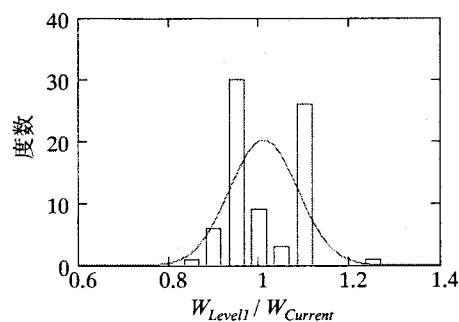


c) 直立消波ブロック堤

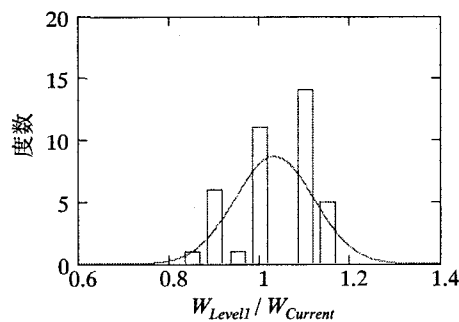


d) 消波ケーソン堤

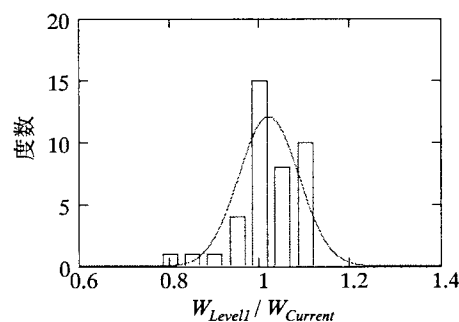
図-3 システム信頼性指標のばらつき



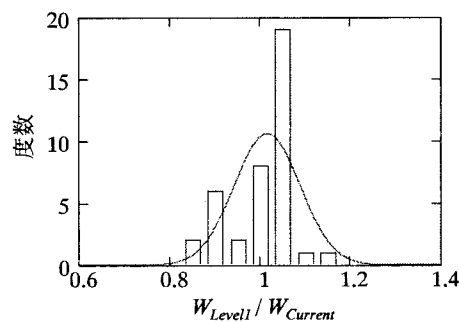
a) ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤



b) 上部斜面面堤



c) 直立消波ブロック堤



d) 消波ケーソン堤

図-4 堤体重量比の分布

5. まとめ

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）を対象に，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．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．

これまでの安全率法に代わりレベル1設計法を導入するもう1つ利点は，研究の進展等によって設計因子の信頼度が向上した場合に，それを設計結果に反映させることができることにある．すなわち，新たな推定精度（変動係数）を用いて対象となる部分

係数のみを修正することによって，より経済的な設計とすることが可能となる⁹⁾．

また，本研究で構築したレベル1信頼性設計法は，力の釣合いに基づく方法であるから，変形量，特に下迫ら⁷⁾が提案する確率的滑動量の観点からは合理的ではない可能性がある．今後は，滑動安全性照査に用いる部分係数を，滑動量の観点から設定する方法を検討する予定である．

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2001.
- 2) 長尾 毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の適用，土木学会論文集 No.689，I -57，pp.173-182，2001.
- 3) 吉岡 健，長尾 毅，鷺尾朝昭，森屋陽一：重力式特殊防波堤の外的安定問題に関する信頼性解析，海岸工学論文集，第51巻，pp.751-755，2004.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，1999.
- 5) 吉岡 健，長尾 毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する安全性指標と感度係数の関係，海洋開発論文集，第20巻，pp.197-202，2004.
- 6) 吉岡 健，長尾 毅：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，pp.401-412，2005.
- 7) 下迫健一郎，高橋重雄：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，第37巻，第3号，1998.