

消波ブロック被覆堤の滑動量に基づく レベル1信頼性設計法

LEVEL-1 RELIABILITY-BASED DESIGN METHOD IN VIEW OF SLIDING DEFORMATION FOR CAISSON-TYPE BREAKWATERS WITH WAVE DISSIPATING WORKS

吉岡 健¹・長尾 毅²・森屋陽一³

Takeshi YOSHIOKA, Takashi NAGAO and Yoichi MORIYA

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

²正会員 工博 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)

³正会員 工博 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

This paper describes the level-1 reliability-based design method in view of sliding deformation for caisson-type breakwaters with wave dissipating works. Reliability analysis based on FORM (First-Order Reliability Method) was conducted by using 37 cases of breakwaters constructed all over Japan. In this study, the model proposed by Moriya et al. for calculating sliding deformation was applied to performance function, 10 or 30 cm was used for allowable sliding deformation and 8.2×10^{-3} was used for target failure probability. As a result of this analysis, partial safety factors were calibrated appropriately. Moreover, it was shown that rational and economical design would be possible by using this design method compared with the present design method based on factor of safety.

Key Words : *reliability-based design, partial safety factor, expected sliding deformation, caisson-type breakwater*

1. はじめに

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, 構造物の設計法として信頼性設計法が位置づけられたことから, 同設計法の適用に関する研究が各方面で進められている。信頼性設計法は, 従来の安全率や許容応力度に基づく設計法のように各設計因子を確定値扱いとするのではなく, それらが何らかの不確実性を有することを前提に確率論的手法によって構造物の破壊可能性を定量的に評価し, かつ制御する方法である。信頼性設計法の中でも, 最も平易な設計法であるレベル1信頼性設計法(部分安全係数法, 以下, レベル1設計法と略称)は, 汎用性, 利便性の観点から標準的な設計法としてその導入が期待されている¹⁾。

ここでケーソン式混成堤の外的安定問題に着目すると, これまで力の釣合いに基づく信頼性設計法(長尾²⁾)と, 確率の変形量, 特に滑動量に基づく信頼性設計法(下迫・高橋³⁾)が提案されている。前者は, 滑動, 転倒, 支持力破壊を対象とし, 従来の設計手法の利便性を維持しながらもその合理性を高めた設計手法であるが, 僅かでも荷重が耐力を上回れば破壊と判定するために大きな経済性を期待できないという課題がある。後者は, 滑動に関する運動方程式を数値積分して1波毎の滑動量を算定し, これ

を設計供用期間分繰り返して総滑動量とし, さらにこれをモンテカルロシミュレーションによって設計供用期間中の期待滑動量として性能を評価する方法である。本設計法は, 港内の静穏度を確保するという防波堤の要求性能を満足する上ではより高度な設計手法ではあるが, 計算にやや時間を要することや, 滑動以外の破壊モードを考慮したシステムとしての議論が困難であるなどの問題がある。

以上の背景のもと, 鷲尾ら⁴⁾は全国広範囲より防波堤の建設事例を収集し, これをもとに信頼性解析を実施して, 力の釣合いに基づく破壊確率と変形量に基づく破壊確率の相関関係を明らかにした。さらに, 森屋ら⁵⁾は精度の良い簡易滑動量算定モデルを提案し, それをケーソン式混成堤に適用してレベル1設計法の手順を構築した。そこで本研究では, この簡易滑動量算定モデルを消波ブロック被覆堤に適用してキャリブレーションを実施することにより, 今後の滑動量に基づくレベル1設計法構築のための基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 滑動量に基づくレベル1設計法の概要

(1) 簡易滑動量算定モデルの概要

森屋ら⁵⁾が提案した簡易滑動量算定モデルとそれを用いたレベル1設計法の手順について以下に示す。

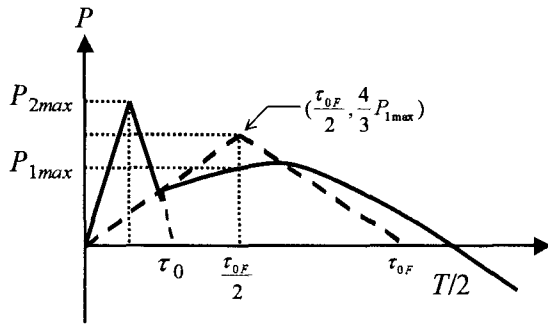


図-1 谷本ら⁹⁾による波力の時系列モデル

簡易滑動量算定モデルとは、波力の時系列モデルとして図-1に示す谷本ら⁹⁾による衝撃波力および砕波波力成分を表す三角パルス波形と重複波力成分を表す正弦波形を考え、ケーソンの滑動に関する運動方程式を解析的に2回積分して構築したものである。同モデルは、衝撃波力および砕波波力成分に対するモデルAと、重複波力成分の影響も考慮したモデルBで構成され、重複波力成分が滑動に寄与するかどうかの判定によってモデルの使い分けを行っている。モデルAおよびモデルBによる滑動量算定式を(1)～(4)式に示す。

モデル A

$$S = \frac{3+2\sqrt{2}}{W/g+M_a} \frac{\tau_0^2}{4} \times \left\{ \frac{P_{2max} + \mu U_{max}}{3} - \mu W' + \frac{(\mu W')^2}{P_{2max} + \mu U_{max}} - \frac{(\mu W')^3}{3(P_{2max} + \mu U_{max})^2} \right\} \quad (1)$$

ここで、 S ：滑動量(m)、 τ_0 ：波力の作用時間(s)、 W ：堤体の空中重量(kN/m)、 g ：重力加速度(m/s²)、 M_a ：付加質量(kg) ($=1.0855\rho_0 h'^2$ 、 ρ_0 ：海水の密度(kg/m³)、 h' ：ケーソン設置水深(m))、 P_{2max} ：合田式において波圧係数 α^* を考慮した水平波力(kN/m)、 U_{max} ：合田式における揚圧力(kN/m)、 μ ：摩擦係数、 W' ：堤体の水中重量(kN/m)である。

モデル B

$$S = \frac{3+2\sqrt{2}}{W/g+M_a} \frac{\tau_{0F}^2}{4} \times \left\{ \frac{P'_{1max} + \mu U'_{max}}{3} - \mu W' + \frac{(\mu W')^2}{P'_{1max} + \mu U'_{max}} - \frac{(\mu W')^3}{3(P'_{1max} + \mu U'_{max})^2} \right\} \quad (2)$$

$$P'_{1max} = \frac{4}{3} P_{1max} \times \tanh \left\{ \frac{P_{1max}}{\mu(W' - U_{max})} \right\} \quad (3)$$

$$U'_{max} = \frac{4}{3} U_{max} \times \tanh \left\{ \frac{P_{1max}}{\mu(W' - U_{max})} \right\} \quad (4)$$

ここで、 τ_{0F} ：有限振幅波理論において水位が正となる時間(s)、 P_{1max} ：合田式において波圧係数 α_1 のみ考慮した時の水平波力(kN/m)であり、その他の記号は(1)式と同じである。

モデルAは、波力時系列として衝撃波力および砕波波力成分を表す三角パルス波形のみを対象として導出したものである。一方、モデルBは、重複波力成分を表す正弦波形を図-1中の破線に示す三角波形に置換えて導出したものである。なお、 τ_0 、 τ_{0F} の算定法については下迫・高橋³⁾を参照されたい。

(1) レベル1設計法の手順

滑動量に基づくレベル1設計法に用いる安全性照査式は、(1)式または(2)式で評価した滑動量 S を用いて(5)式で表される。

$$S_a \geq S \quad (5)$$

ここで、 S_a は破壊を定義する滑動量、すなわち許容滑動量を表す。

以下にレベル1設計法の手順を示す。

- ① モデルAを用いた安全性照査式により、堤体幅を決定する。
- ② (6)式により、モデルAの適用範囲内であるかどうかの判定をする。

$$\frac{P_{1max}}{\mu(W' - U_{max})} < 1.2 \quad (6)$$

- ③ (6)式を満足する場合は、①で求めた堤体幅が必要堤体幅である。
- ④ (6)式を満足しない場合は、モデルBを用いた安全性照査式により求めた、堤体幅が必要堤体幅である。

滑動量 S の算出においては、各設計因子の特性値（現行設計法で用いる値）に、後述する部分安全係数を乗じた設計用値を用いる。また、(6)式を満足せず、モデルBにより決定した堤体幅が、(6)式を満足してしまう場合があるが、その場合でもモデルBによって決定した堤体幅を採用することとする。

3. 消波ブロック被覆堤への適用

(1) 検討方法

検討事例は、全国広範囲の消波ブロック被覆堤の建設事例より、地域的、設計条件的に偏りがないように収集した37ケースを対象とした。また、信頼性解析に用いる性能関数 Z は、(5)式における許容滑動量 S_a と滑動量 S との差で定義される。本研究では、森屋ら⁵⁾と同様に、 S をモデルA、Bの使い分けで算出し、 S_a を30cmとした場合をCase1とする。ここで S_a の値は、50年確率波高来襲時の滑動量に基づく破壊確率と実被災事例による破壊確率との比較⁴⁾より、その対応関係の良い30cmを選んだ。さらに、 S をモデルAのみで算出し、 S_a を10cmとした場合をCase2とする。これは、消波ブロック被覆堤直立部の波圧実験⁸⁾より、実際に消波ブロック被覆堤に作用する波圧波形は、正弦波成分よりも三角パルス波成分の方が卓越している結果を反映したものである。さらに、ケーソンの滑動は消波ブロックの変形につながり、そこでの波力が衝撃砕波力となる恐れがあるため、 S_a を小さくしている。設計因子の従う確率

表-1 設計因子の従う確率分布

	B	V
波力(水平波圧, 揚圧力)		
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 (1/30 未満)	0.97	0.04
水深変化急 (1/30 以上)	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
潮位		
$R_{WL}=1.5$	1.00	0.20
$R_{WL}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数	1.06	0.15
単位体積重量		
堤体	1.00	0.03

注) B は平均値の偏り (平均値/特性値), V は変動係数
 R_{WL} は既往最高潮位 (H.H.W.L.) とさく望平均満潮位 (H.W.L.) の比

分布は, 長尾²⁾を参照し, 表-1 に示す値を用いた。また, 目標とする安全性水準は, 長尾²⁾が行った現行設計による平均安全性水準の検討結果から, 目標安全性指標 β_T を 2.4 (破壊確率換算で, 8.2×10^{-3}) とした。

以上をもとに, 1 次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) を用いた安全性指標および感度係数の検討を行い, レベル 1 設計法における部分安全係数のキャリブレーションを行う。また, 本研究において後述する感度係数の評価方法を変えたことにより, その評価精度が向上し, さらに合理的な設計となる部分安全係数が算定可能となったため, ケーソン式混成堤 35 ケースをもとにした, Case1 によるキャリブレーションについても再度実施した。なお, 解析には RCP GmbH 社製の信頼性解析プログラム「COMREL」を用いた。

(2) 設計因子の確率分布および相関係数

性能関数 Z において確率変数として扱う設計因子は, 波力作用時間 τ (モデル A の τ_0 , モデル B の τ_{0F}), 水平波力 P (モデル A の P_{1max} , モデル B の P_{2max}), 揚圧力 U (モデル A およびモデル B の U_{max}), 摩擦係数 μ , 堤体自重 W , 潮位 WL である。

検討はまず, 表-1 に示した沖波波高推定精度, 波浪変形計算精度, 砕波変形推定精度, 波力算定式推定精度および潮位の確率分布を用いて, 検討対象である 37 ケースについてモンテカルロシミュレーションを実施し, 水平波力, 波力作用時間の確率分布および相関係数をケース毎に評価した。ここで, 表-1 に示したように波浪変形計算精度および潮位の従う確率分布は条件によって異なるが, 潮位の従う確率分布の違いが水平波力および波力作用時間に与える

表-2 波力および波力作用時間の確率分布および相関係数

(a) ケーソン式混成堤					
設計因子	水深変化	モデル A		モデル B	
		B	V	B	V
τ	緩	1.091	0.071	1.027	0.021
	急	1.064	0.109	1.018	0.034
P, U	緩	0.741	0.262	0.760	0.247
	急	0.828	0.276	0.834	0.256
相関係数		-0.655		-0.623	

(b) 消波ブロック被覆堤					
設計因子	水深変化	モデル A		モデル B	
		B	V	B	V
τ	緩	1.115	0.088	1.033	0.026
	急	1.064	0.109	1.018	0.034
P, U	緩	0.700	0.199	0.700	0.199
	急	0.770	0.210	0.770	0.210
相関係数		-0.769		-0.785	

影響は, ケース間の条件の違いによるばらつきに比較して無視し得るため, 水深変化の緩急のみに分けて評価した。また, 揚圧力については, 水平波力と同一の確率分布に従うことから完全相関とした。

算出した波力, 波力作用時間の確率分布および相関係数を全ケースで平均したものを表-2 に示す。ただし, 水深変化が急に該当するケースは, 対象ケースの中には含まれていないため, 該当するケーソン式混成堤の事例 1 ケースの設計条件をもとに, これを消波ブロック被覆堤に仮定して算出している。波力の平均値の偏り, 変動係数は, いずれもケーソン式混成堤の方が大きい, これは表-1 に示すケーソン式混成堤の波力算定式推定精度の方が, 危険側の推定になることを反映している。また, 消波ブロック被覆堤の場合, 衝撃波力および砕波力成分に乗じる波力低減係数 λ_2 を 0 とするため, P_{2max} は P_{1max} に等しい値となる。ゆえに, モデル A, B における波力の確率分布は一致する。また, 波力と波力の作用時間との相関係数は, いずれも高い負の相関を示す。これは波力の作用時間が波高に対して負の比例関係にあることによる。

(3) 感度係数の評価

次に信頼性解析 (FORM) を実施し, 各設計因子の感度係数を評価した。感度係数とは, (7) 式に示すとおり, 性能関数の線形化近似における線形化近似係数であり, 標準化空間における安全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重要度を表す。

$$\alpha_X = \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)_{X^*} \cdot \frac{\sigma_X}{\sigma_Z} = - \left(\frac{X^* - u_X}{\sigma_X} \right) / \beta \quad (7)$$

ここに, α : 感度係数, X^* : 確率変数 X の破壊点における値, u : 平均値, σ : 標準偏差, β : 安全

表-3 感度係数 (森屋ら⁵⁾)
(a) ケーソン式混成堤 (Case1)

設計因子	モデル A		モデル B	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
τ	-0.093	0.030	-0.014	0.010
P	-0.564	0.122	-0.656	0.105
U	-0.001	0.009	-0.004	0.003
μ	0.785	0.076	0.715	0.081
W	0.174	0.045	0.196	0.030
WL	-0.040	0.028	-0.051	0.020

表-4 感度係数 (本研究)
(a) ケーソン式混成堤 (Case1)

設計因子	モデル A		モデル B	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
τ	0.422	0.037	0.442	0.020
P, U	-0.749	0.017	-0.726	0.020
μ	0.621	0.024	0.652	0.023
W	0.204	0.011	0.209	0.010
WL	-0.061	0.036	-0.054	0.022

(b) 消波ブロック被覆堤 (Case1)

設計因子	モデル A		モデル B	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
τ	0.415	0.027	0.508	0.026
P, U	-0.630	0.012	-0.664	0.016
μ	0.734	0.012	0.713	0.016
W	0.220	0.013	0.216	0.015
WL	-0.070	0.036	-0.065	0.025

(c) 消波ブロック被覆堤 (Case2)

設計因子	モデル A		モデル B	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
τ	0.439	0.035		
P, U	-0.637	0.011		
μ	0.733	0.011		
W	0.219	0.014		
WL	-0.078	0.024		

性指標である。

感度係数の評価にあたり、森屋ら⁵⁾は、実際に建設された設計断面における信頼性解析結果によって評価していたため、若干そのばらつきが大きいという問題があった。本研究ではまず、全ケースについて堤体幅を変化させた信頼性解析を実施し、安全性指標が目標値である 2.4 となる断面を見つけ、その断面における感度係数を評価した。

森屋ら⁵⁾の検討による感度係数の平均値および標準偏差を表-3 に、本研究による算出値を表-4 に示す。特に波力や摩擦係数について、感度係数の標準偏差が小さくなっている。このように、目標安全性指標 β_T に基づくレベル 2 信頼性設計を予め実施しておくことで、感度係数のばらつきは低減される。また、感度係数の平均値を森屋ら⁵⁾と比較すると、波力や波力作用時間について値が大きく異なっている。一般に荷重側の感度係数は負値を示すため、各確率変数を独立とみなした森屋ら⁵⁾の検討においては、波力作用時間の感度係数が負値となっている。しかし

表-5 部分安全係数
(a) ケーソン式混成堤 (Case1)

	モデル A		モデル B	
	水深変化緩	水深変化急	水深変化緩	水深変化急
γ_τ	1.01	0.95	1.00	0.98
γ_P, γ_U	1.09	1.24	1.09	1.21
γ_μ	0.82		0.81	
γ_W	0.98		0.98	
γ_{WL}				
$V=0.2$	1.03		1.03	
$V=0.4$	1.06		1.05	
H.H.W.L.	1.00		1.00	

(b) 消波ブロック被覆堤 (Case1)

	モデル A		モデル B	
	水深変化緩	水深変化急	水深変化緩	水深変化急
γ_τ	1.02	0.95	1.00	0.98
γ_P, γ_U	0.91	1.01	0.92	1.03
γ_μ	0.78		0.79	
γ_W	0.98		0.98	
γ_{WL}				
$V=0.2$	1.03		1.03	
$V=0.4$	1.07		1.06	
H.H.W.L.	1.00		1.00	

(c) 消波ブロック被覆堤 (Case2)

	モデル A		モデル B	
	水深変化緩	水深変化急	水深変化緩	水深変化急
γ_τ	1.01	0.94		
γ_P, γ_U	0.91	1.02		
γ_μ	0.78			
γ_W	0.98			
γ_{WL}				
$V=0.2$	1.04			
$V=0.4$	1.07			
H.H.W.L.	1.00			

ながら、本研究では確率変数間の相関を考慮したため、波力作用時間の感度係数は正值へと変化している。これは、表-2 に示したように、波力と波力作用時間が高い負の相関を有するためである。いずれの場合も波力および摩擦係数の感度係数の絶対値が大きく、安全性指標に大きな影響を及ぼす設計因子であることがわかる。また、消波ブロック被覆堤の Case1 と Case2 を比較すると、感度係数の平均値がわずかに変化している。これは、Case2 の場合、 S_0 を 10cm としたことによって目標安全性指標 2.4 を満足する堤体幅が異なり、性能関数に占める各確率変数の標準偏差の割合が変化したためである。

(4) 部分安全係数

確率変数 X の部分安全係数 γ_X は、(7)式を X^* に関する等式に変形することによって、(8)式により算定できる。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) B_X \quad (8)$$

(7)、(8)式より、部分安全係数は各設計因子の特性値を、目標安全性指標のもとでの破壊点（設計点）に

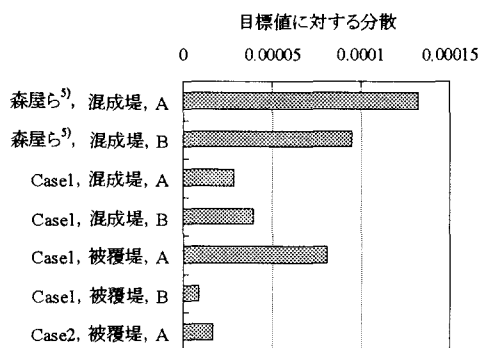


図-2 目標破壊確率に対する破壊確率の分散

変換する係数であると解釈できる。

表-1, 表-2 に示した各設計因子の確率分布, および表-4 に示した感度係数を用い, $\beta_T = 2.4$ に対する部分安全係数を算定した結果を表-5 に示す。

次に, 表-5 に示した部分安全係数の妥当性について確認する。通常, 部分安全係数の最適案の判定は(9)式によって行う。すなわち, 目標破壊確率とレベル1設計結果が保有する破壊確率の分散が最小となる案を最適案として採用する。

$$\sum (P_{fi} - P_{fr})^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

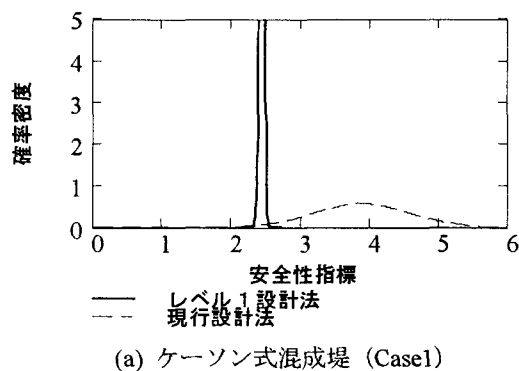
ここに, P_{fi} : 目標破壊確率 (今回は, 8.2×10^{-3}), P_{fr} : 信頼性設計法による破壊確率である。

図-2 に, 森屋ら³⁾が(9)式によって判定した最適案に対する比較を示す。これを見ると, 森屋ら³⁾の最適案よりも目標値に対する分散が全て小さい値となっており, 今回構築した部分安全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。

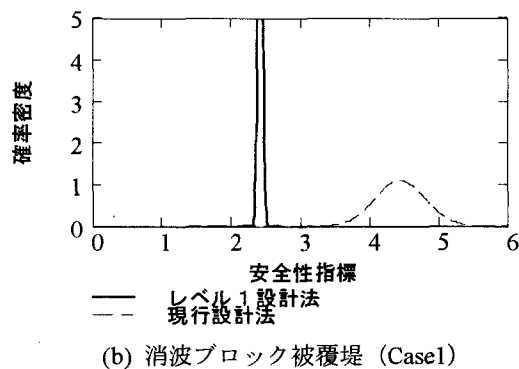
(5) 構築したレベル1設計法の有用性

構築したレベル1設計法の合理性, 信頼性, 経済性について示す。図-3 は, レベル1設計法によって設計した場合と, 現行設計法すなわち力の釣合いに基づく滑動安全率 1.2 によって設計した場合で, 安全性指標のばらつきを評価したものである。今回提案する方法によって安全性のばらつきは極めて小さくなり, 合理的な設計が可能となる。

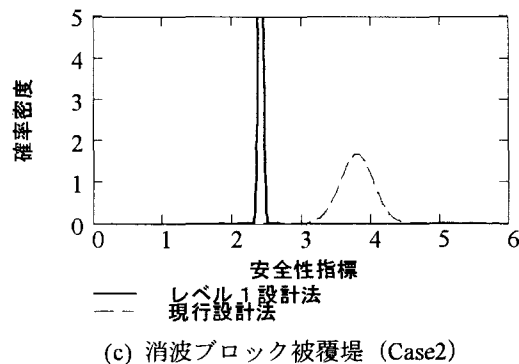
図-4 は, レベル1設計法により設計した堤体幅と現行設計法およびレベル3信頼性設計法 (以下, レベル3設計法と略称) により設計した堤体幅を比較したものである。ここで, レベル3設計法とは下迫ら³⁾の方法による50年確率波来襲時の期待滑動量が30cm以下となるように設計したものである。図より, 構築したレベル1設計法は, レベル3設計法とほぼ同様の設計結果を与えることがわかる。特に, 消波ブロック被覆堤については, Case1 よりも Case2 の方がレベル3設計法による設計結果と良く一致していることから, 三角パルス波形のみを考慮したモデルAを用い, 許容滑動量 S_0 を小さくしたレベル1設計



(a) ケーソン式混成堤 (Case1)



(b) 消波ブロック被覆堤 (Case1)

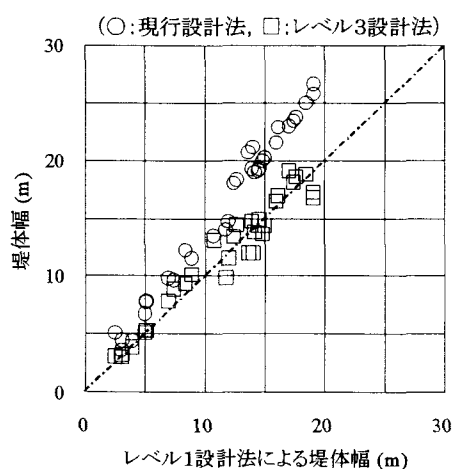


(c) 消波ブロック被覆堤 (Case2)

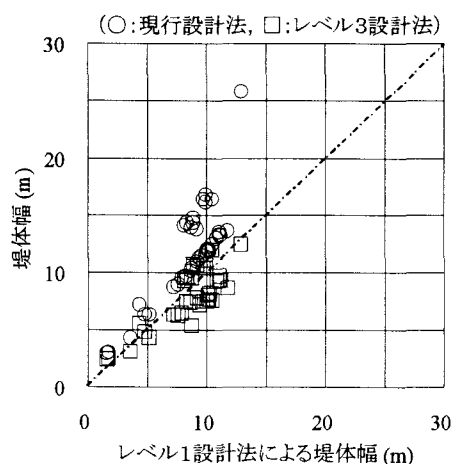
図-3 安全性指標のばらつき

法の方が適しているものと考えられる。また, 現行設計法による堤体幅と比較するといずれの場合も堤体幅が小さくなっており, 本手法の適用による建設コスト縮減効果が期待される。

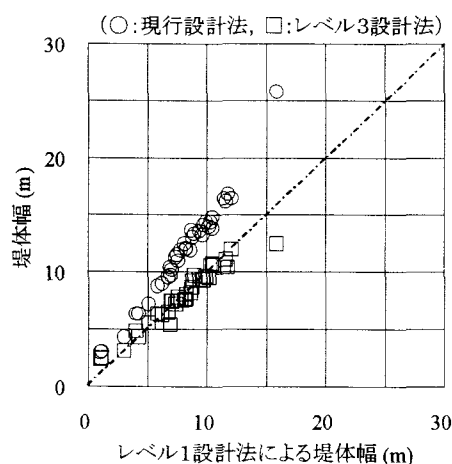
図-5 に, 構築したレベル1設計法により設計した堤体幅の安全率との関係の一例を示す。図には, 各設計因子の特性値 (現行用値) によって算出した現行安全率と, 各設計因子の平均値によって算出した中央安全率を併記している。現行安全率では全ケースについて 1.0 を下回るが, 中央安全率で見るとほとんどのケースで 1.0 を上回っている。これは, 表-1, 表-2 の平均値の偏りに示したとおり, 特に波力や摩擦係数について安全側の評価をしているためであり, 構築したレベル1設計法を用いても, 平均的には滑動が生じないことがわかる。



(a) ケーソン式混成堤 (Case1)



(b) 消波ブロック被覆堤 (Case1)



(c) 消波ブロック被覆堤 (Case2)

図-4 堤体幅の比較

4. まとめ

本研究では、森屋らの提案する簡易滑動量算定モデルを消波ブロック被覆堤に適用し、滑動量に基づくレベル1設計法構築のための部分安全係数のキャリブレーションを実施した。また、本研究において

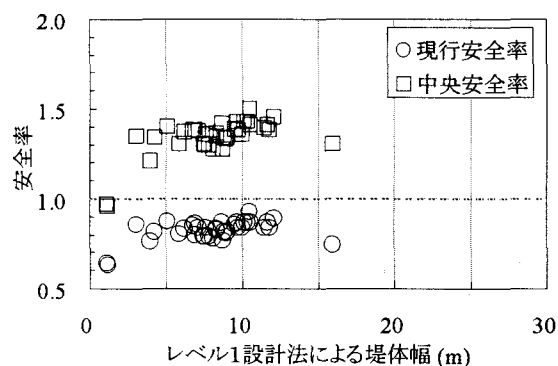


図-5 レベル1設計法と安全率の関係
消波ブロック被覆堤 (Case2)

感度係数の評価精度を高めることにより、さらに合理的な設計を可能としたため、ケーソン式混成堤についても再検討した。さらに、構築した設計法の合理性、信頼性を確認するとともに、現行設計法に比較して、経済性が発揮されることを示した。

しかしながら、本研究で用いた簡易滑動量算定モデルは50年確率波1波を対象としており、設計供用期間(通常は50年)における累積滑動量を考慮していないため、設計供用期間中の累積滑動量の観点からはやや危険な設計になる可能性がある。このため、今後は滑動量に基づくレベル1設計法について、波浪の極値分布形を考慮した検討を行う予定である。

本研究の遂行にあたり、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より、モンテカルロ法による滑動量算定プログラムをご提供頂くとともに、貴重な助言を頂戴しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
- 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) 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.
- 4) 鷺尾朝昭，森屋陽一，長尾 毅：ケーソン式混成堤の滑動破壊における信頼性設計の制御対象に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.906-910，2003.
- 5) 森屋陽一，鷺尾朝昭，長尾 毅：ケーソン式混成堤の滑動量に基づくレベル1信頼性設計法，海岸工学論文集，第50巻，pp.901-905，2003.
- 6) 谷本勝利，古川浩司，中村廣昭：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.846-850，1996.
- 7) 高橋重雄，谷本勝利，下迫健一郎，細山田得三：混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案，海岸工学論文集，第39巻，pp.676-680，1992.
- 8) 高橋重雄，谷本勝利，下迫健一郎：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，第29巻，第1号，1990.