

波浪の極値分布を考慮した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 FOR BREAKWATERS
COVERED WITH WAVE- DISSIPATING BLOCKS IN VIEW OF SLIDING
DEFORMATION CONSIDERING WAVE EXTREME VALUE DISTRIBUTION

吉岡 健¹・佐貫 哲朗²・長尾 毅³・森屋陽一⁴
Takeshi YOSHIOKA, Tetsuro SANUKI, Takashi NAGAO and Yoichi MORIYA

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 復建調査設計(株)(〒732-0052 広島県広島市東区光町 2-10-11)

³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)

⁴正会員 博(工) 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 study develops the level-1 reliability-based design method for breakwaters covered with wave-dissipating blocks based on the sliding deformation in regard of wave extreme value distribution. We compared the failure probability based on the sliding deformation caused by single highest wave and that based on the cumulative sliding deformation during design service period (abbreviated as level-3 method). As a result of this study, we proposed the method to determine the target reliability index for the level-1 design method by using the design conditions such as wave extreme value distribution and so on. Moreover, we showed that the proposed method is almost equivalent to the level-3 method in terms of reliability.

Key Words : level-1 reliability-based design, breakwater covered with wave-dissipating blocks, sliding deformation, wave extreme value distribution

1. はじめに

ISO2394(構造物の信頼性に関する一般原則)を契機として,土木および建築構造物への信頼性設計法の適用に関する研究が各方面で進められている。中でも,レベル1信頼性設計法(部分係数法)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²⁾と確率の変形量,特に滑動量に基づく信頼性設計法³⁾(以下,レベル3設計法と称す)が提案されている。後者は,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,モンテカルロシミュレーションを必要とし,設計実務への汎用性,利便性という点で課題が残される。そこで森屋ら⁴⁾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滑動量に基づくレベル1信頼性設計法(以下,レベル1設計法と称す)を構築した。これは,許容滑動量 S_a に対する超過確率を破壊確率 P_f と定義し,それを目標破壊確率 P_{fT} 以下に制御する手法である。しかしながら,森屋ら⁴⁾の研究では50年確率波1波での滑動量を対象としていることから,設計供用期間中の累積

滑動量が S_a を超過する確率(以下,破壊確率 P_{f50} と定義する)は,波浪の極値分布形状により大きく変化するものと考えられる。

先に著者ら⁵⁾は,ケーソン式混成堤を対象とし,レベル1設計法による設計断面の,設計供用期間の破壊確率 P_{f50} と極値分布形状との相関関係を明らかにした。さらに, P_{f50} を制御対象とするためのレベル1設計法における目標値 P_{fT} の修正方法を提案した。本研究では,これを消波ブロック被覆堤に適用し,波浪の極値分布を考慮した滑動量に基づくレベル1設計法を構築す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⁴⁾が提案した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⁶⁾による三角パルス波形に正弦波形を組み合わせたモデルを考え,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,衝撃砕波力および砕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(式(1)~(4)),重複波力成分が滑動に寄与する

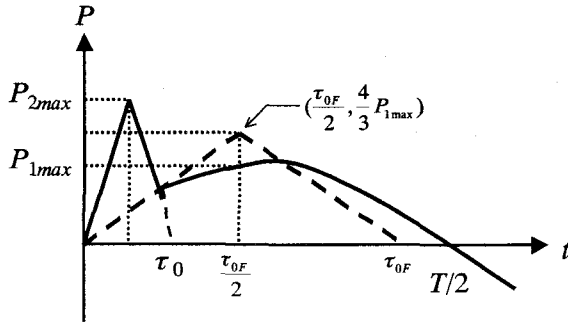


図-1 谷本ら⁶⁾による波力の時系列モデル

かどうかによってモデルの使い分けを行っている。

(モデル A)

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

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

(モデル B)

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

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

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

ここに、 τ_{0F} : 有限振幅波理論において水位が正となる時間 (s), $P_{1\max}$: 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 (N/m) であり、その他の記号は式(1)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碎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。

(2) レベル1 設計法の概要

森屋ら⁴⁾が提案する滑動量に基づく性能関数 Z は、式(1)または式(2)で評価した滑動量 S および許容滑動量 S_a を用い、式(5)によって定義される。

$$Z = S_a - S \quad (5)$$

性能関数 Z において確率変数として扱う設計因子は、水平波力 P 、揚圧力 U 、波力作用時間 τ 、摩擦係数 μ 、堤体自重 W 、潮位 WL である。レベル1 設計における安全性照査の際には、これら設計因子の特性値（現行設計法で用いる値）に、部分係数を乗じた設計用値を用いる。

部分係数は、各設計因子の特性値に乘じることによって、設計点を目標とする破壊点に一致させるための係数であり、確率変数 X の部分係数 γ_X は次式によって算出される。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_{1T} V_X) B_X \quad (6)$$

ここに、 β_{1T} はレベル1 設計に用いる目標信頼性指標、 α_X , V_X , B_X はそれぞれ確率変数 X の感度係数、変動係数および平均値の偏り（平均値と特性値の比）である。

感度係数とは、式(7)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。

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

ここに、 X^* は確率変数 X の破壊点における値、 u は平均値、 σ は標準偏差である。

高橋ら⁷⁾が行った消波ブロック被覆堤直立部の波圧実験によると、実際に消波ブロック被覆堤に作用する波圧波形は、正弦波形成分よりも三角パルス波形成分の方が卓越していることがわかっている。そこでレベル1 設計においては、モデルA のみによって滑動量 S を算出することにする。その代わりに破壊を定義する許容滑動量 S_a を、被災の判定において一般的に用いられる 30cm ではなく、10cm とした設計を実施する。

先に著者ら⁸⁾は、式(6)における目標信頼性指標 β_{1T} を 2.4 として、多数の消波ブロック被覆堤の建設事例に基づく部分係数のキャリブレーションを実施している。ここで、目標信頼性指標は長尾²⁾が行った現行設計による平均安全性水準の検討結果に基づいている。著者ら⁸⁾が得た各設計因子の確率分布と感度係数を、それぞれ表-1 に示す。各設計因子の確率分布は全て正規分布を仮定している。また、感度係数は、式(5)に示す性能関数 Z に基づく信頼性指標 β_1 がちょうど 2.4 となる断面における感度係数を、全

表-1 設計因子の確率分布と感度係数

	平均値の偏り B	変動係数 V	感度係数 α
波力 (P_U)			
水深変化緩	0.700	0.199	-0.637
水深変化急	0.770	0.210	
波力作用時間 (τ)			
水深変化緩	1.115	0.088	0.439
水深変化急	1.064	0.109	
潮位 (WL)			
$r_{WL}=1.5$	1.000	0.200	-0.078
$r_{WL}=2.0, 2.5$	1.000	0.400	
摩擦係数 (μ)	1.060	0.150	0.733
単位体積重量 (W)			
堤体	1.000	0.030	0.219

注) r_{wl} : 既往最高潮位とさく望平均満潮位の比
水深変化緩/急: 海底勾配 1/30 未満/以上

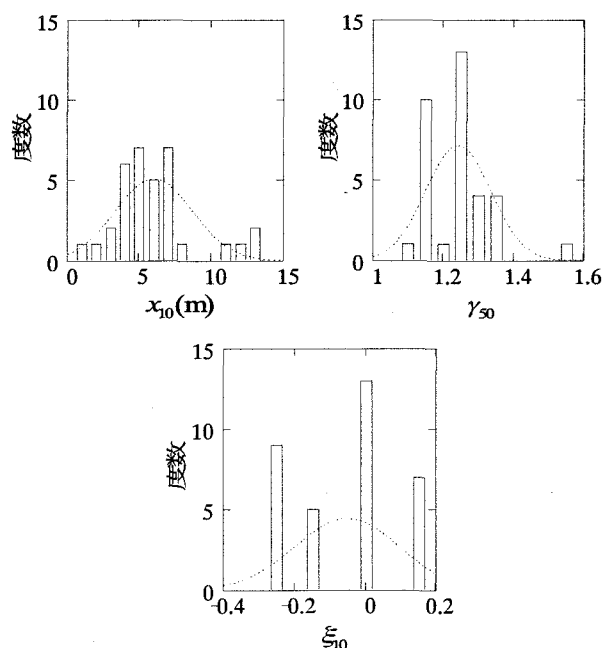


図-2 位置、尺度、形状母数の頻度分布

事例について平均して算出したものである。

3. 波浪の極値分布形の影響

本章では、設計波1波による破壊確率 P_{fl} を制御対象として設計した場合に、設計供用期間中の来襲波群による破壊確率 P_{f50} がどの程度変化するかを検討し、波浪の極値分布形の影響を議論する。また、以下の検討では、設計供用期間を通常用いられる50年とする。

(1) 極値分布形の推定

本研究では、全国の消波ブロック被覆堤の設計資料から設計条件の偏りがなくように収集した34ケースを検討対象とした。検討はまず、収集した設計資料には、対象海域における沖波の極値分布形が明記されていないため、既往の研究成果を用いてこれを推定した。まず、高田ら⁹⁾によってまとめられている全国各地の沖波表から、対象事例に最も近い沖波波高(再現期間10年, 30年, 50年, 100年)を抽出する。次に、最小二乗法によって波浪の極値の最適母分布関数を当てはめる。ここで、母分布関数は合田ら¹⁰⁾を参照して全てワイブル分布とし、その形状母数 k を、日本海沿岸で2.0, 東シナ海沿岸で1.4, 太平洋沿岸(波浮以東)で1.0, 太平洋沿岸(波浮以西)で0.75とした。続いて、同じく高田ら⁹⁾によってまとめられている全国各地の沿岸係数表を用い、換算沖波波高としての極値分布形を定めた。本研究では、極値分布形の特性を母分布関数の違いや形状母数の値に依存しにくい、北野¹¹⁾が提案した汎用指標によって整理した。用いた汎用指標は、位置母数として10年確率波高 x_{10} 、尺度母数として合田¹²⁾が提案する裾長さパラメータ r_{50} (50年確率波高 x_{50} に対する10年確率波高

x_{10} の比)、形状母数として次式に示す ξ_{10} である。

$$\xi_{10} = \log_5 \frac{x_{50} - x_{10}}{x_{10} - x_2} \quad (8)$$

ここに、 x_i は添字 i を再現年数とする確率波高(m)である。

得られた結果の頻度分布を図-2に示す。これら3指標の値は広く分布しており、ケースによって沖波の極値分布形は大きく異なることがわかる。

(2) 滑動量と極値分布形の相関

まず、著者ら⁹⁾が目標信頼性指標 β_{17} を2.4(破壊確率 P_{fl} 換算で、 8.2×10^{-3})として構築した部分係数を用い、レベル1設計を実施した。得られた堤体幅に対し、レベル3設計法により、設計供用期間中の累積滑動量による破壊確率 P_{f50} を算出した。レベル3設計においても、三角パルス波形成分のみによって1波毎の滑動量を算出している。図-3に、 P_{f50} と P_{fl} の比の値と、極値分布形を表す3指標および堤前水深 $h(m)$ との相関を示す。図中の R は、破線で示した線形関数もしくは指数関数によって近似した場合の相関係数を表す。これを見ると、 P_{f50}/P_{fl} の値はケースによって大きく変化しており、最大で120にまで達している。このことは、 P_{fl} を制御しても、 P_{f50} の観点からは危険な設計になることを意味している。各指標との相関性を見ると、まず r_{50} との負の相関性は、著者らが混成堤について行った結果⁹⁾と比較して若干低かった。通常、 r_{50} が小さい、すなわち日本海側のように毎年高波浪が来襲する海域では、 P_{f50} が高くなるものと考えられる。しかしながら、消波ブロック被覆堤の場合、碎波帯内に設置されるケースが多いため、 r_{50} の影響が不明瞭になったものと考えられる。

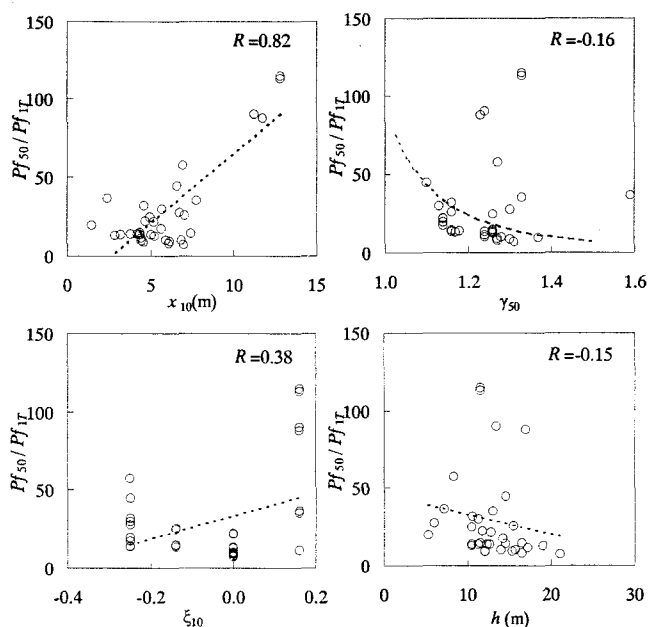


図-3 P_{f50}/P_{f1T} との相関

一方、10年確率沖波波高 x_{10} との正の相関性は、混成堤の場合よりも高い結果となった。しかしながら、 x_{10} のみでは P_{f50}/P_{f1T} を精度良く推定することは困難であるため、 P_{f50} を制御対象とするための P_{f1T} の修正式には、複数の指標を用いる必要がある。

4. 波浪の極値分布を考慮したレベル1 設計法

本章では、 P_{f50} を制御対象とするためのレベル1 設計法における目標値 P_{f1T} の修正方法について検討する。式(6)に示したように、部分係数を計算する際には、破壊確率ではなく信頼性指標が用いられるため、以下では、破壊確率を次式によって信頼性指標に変換し、 β_{50} および β_1 として議論する。

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (9)$$

ここに、 Φ は標準正規確率分布関数である。

(1) 極値分布を考慮した目標安全性の修正

検討はまず、目標信頼性指標 β_{50T} を0.0~2.8まで0.4刻みで変化させ、レベル3 設計法によって対応する破壊確率をちょうど満足する堤体幅を決定した。次に、得られた堤体幅に対し、式(5)に示した性能関数に基づく1次信頼性解析 (FORM: First-Order Reliability Method) を実施し、その保有信頼性指標 β_1 を算出した。得られた β_{50T} と β_1 の相関を図-4に示す。図中の○印は34ケースの平均値を、—印は最大値、最小値を表す。図より、 β_{50} を制御した場合の β_1 は、ケースによって大きく変化することがわかる。しかしながら、 β_{50} と β_1 の正の相関は明確に見受けられ、平均値で見た場合の相関係数は1となっている。このことから、 β_{1T} の修正方法は、 β_{1T} を β_{50T} の線形関数で

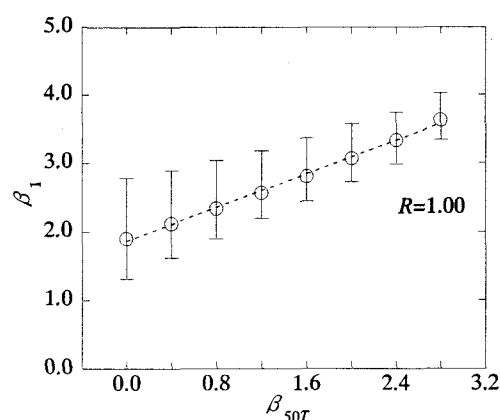


図-4 β_{50T} と β_1 の相関

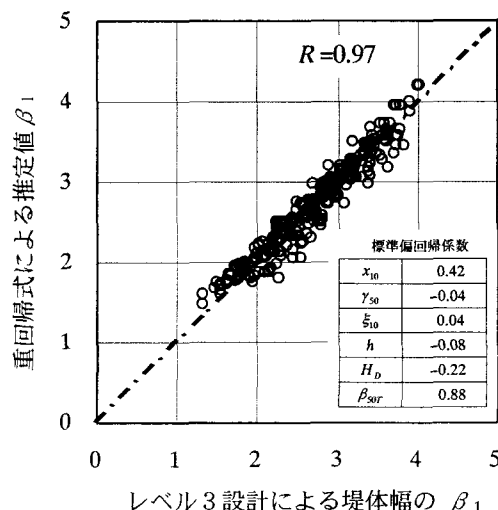


図-5 β_1 の重回帰分析結果

近似し、さらに極値分布形等の設計条件によって補正すればよいと考えられる。

そこで、 β_{50T} および極値分布形を表す3指標に、その他の設計条件を説明変量として加えた線形重回帰分析を実施した。分析の結果、堤前水深 $h(m)$ 、設計波高 $H_D(m)$ を加えた6指標を説明変量とした場合に最も相関が高いことがわかり、 β_{1T} の回帰式として式(10)を得た。

$$\beta_{1T} = 0.62\beta_{50T} + 0.10x_{10} - 0.29\gamma_{50} + 0.18\xi_{10} - 0.02h - 0.06H_D + 2.45 \quad (10)$$

式(10)による β_{1T} の推定結果を図-5に示す。得られた回帰式による重相関係数は0.97と極めて高く、これら6指標を用いることにより、 β_{1T} を精度良く推定可能であることがわかる。また、図中には各指標の標準偏回帰係数を併記している。これにより、 β_{50T} に加え、設計波高 H_D や10年確率沖波波高 x_{10} が β_{1T} に高い影響を及ぼしていることがわかる。

(2) 修正レベル1 設計法の手順

式(10)により推定した β_{1T} に基づくレベル1 設計法

表-2 部分係数の計算例

計算条件	目標安全性 β_{50T}	1.2	2.4
	極値分布形	$x_{10}=4.4(\text{m}), \gamma_{50}=1.26, \xi_{10}=-0.14$	
	堤前水深 $h(\text{m})$	11.5	
	設計波高 $H_D(\text{m})$	8.0	
	海底勾配 S	1/100	
	r_{wl}	2.5	
部分係数	β_{1T}	2.53	3.27
	設計因子	モデル A	
	P_U	0.92	0.99
	τ	1.01	0.97
	WL	1.08	1.10
	μ	0.77	0.68
	W	0.98	0.98

(以下、修正レベル1設計法と称す)の手順を示す。

- ① 設計供用期間中の累積滑動量に基づく破壊確率 P_{f50} の目標値 P_{f50T} を設定し、式(9)により、目標信頼性指標 β_{50T} に変換する。
- ② 得られた β_{50T} および設計条件をもとに、式(10)によって β_{1T} を推定する。
- ③ 得られた β_{1T} および、表-1に示した各設計因子の確率分布と感度係数をもとに、式(6)によって部分係数を算定する。
- ④ 得られた部分係数を用い、レベル1設計を実施し、必要堤体幅を決定する。

上記の方法による部分係数の計算例を表-2に示す。この方法によって部分係数を算定する場合、厳密に言えば、 β_{1T} の値によって感度係数を再評価する必要がある。なぜなら、目標安全性が変化すれば、信頼性指標に与える荷重効果と耐力の影響度合が変化する、すなわち感度係数が変化するからである。しかしながら、感度係数を再評価しない簡易な方法によってもレベル1設計の合理性は維持される¹³⁾ことから、本研究では表-1に示す値をそのまま用いることとした。ただし、得られた β_{1T} が2.4に比べて大きくなる場合(概ね4~5以上)には、 β_{1T} をさらに割増す必要がある。詳細は、文献13)を参照されたい。

また、手順①に示した P_{f50T} の設定方法については、別途検討が必要であるが、ライフサイクルコストを考慮した設定方法が有力であると考えられる。

(3) 修正レベル1設計法の信頼度

今回提案する修正レベル1設計法の信頼度について検討する。図-6は、 β_{50T} を1.2および2.4(破壊確率換算で、 1.2×10^{-4} および 8.2×10^{-3})とした場合の修正レベル1設計法による設計断面と、 β_{1T} を2.4とした場合のレベル1設計法による設計断面について、その保有信頼性指標 β_{50} のばらつきを評価したものである。修正レベル1設計によって、 β_{50} のばらつきは低減さ

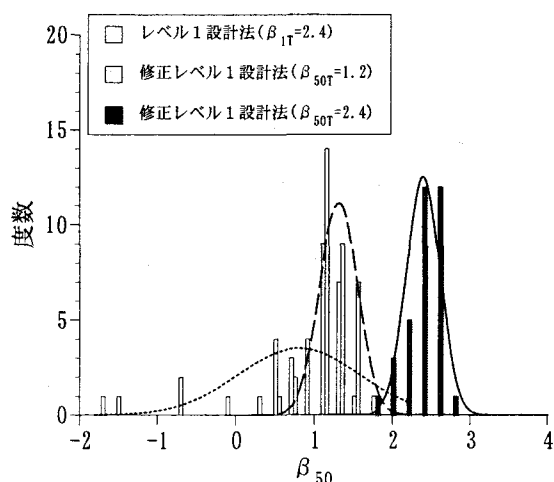


図-6 β_{50} のばらつき

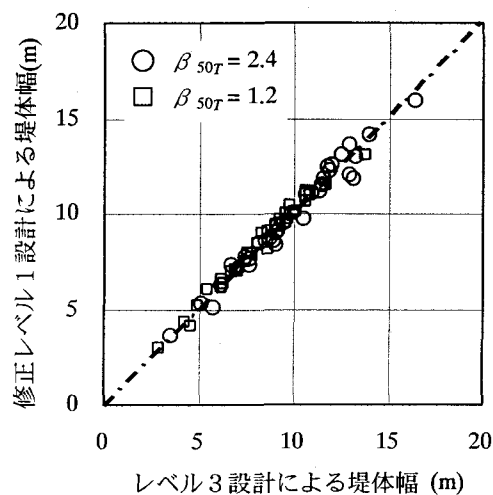


図-7 堤体幅の比較

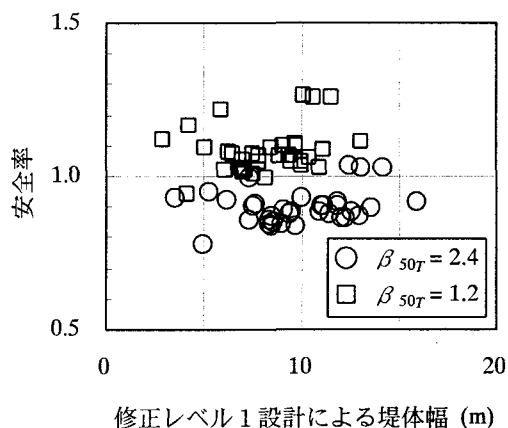


図-8 修正レベル1設計法と滑動安全率の関係

れるとともに、その平均値はほぼ目標値に一致している。図-7は、修正レベル1設計によって決定した堤体幅と、レベル3設計法により決定した堤体幅を比較したものである。これにより、両者の堤体幅は概ね一致していることがわかる。また、参考として、

修正レベル1設計による堤体幅と、その際の現行設計法における滑動安全率の関係を図-8に示す。これを見ると、滑動安全率のばらつきは大きく、現行の安全率によっては安全性を制御できないことがわかる。

以上のことから、今回提案する手法が、設計供用期間中の累積滑動量に基づく安全性を制御対象とした、信頼度の高い設計法であることを確認した。

5. まとめ

本研究ではまず、森屋ら⁴⁾による設計波1波による滑動量に基づく破壊確率 P_f と、下迫・高橋³⁾による設計供用期間中の来襲波群による累積滑動量に基づく破壊確率 P_{f50} との比較を行い、 P_{f50} と P_f の比に対する波浪の極値分布形の影響を明らかにした。その結果、消波ブロック被覆堤においても、設計供用期間中の滑動安全性に対する波浪の極値分布形の影響は大きく、 P_f を制御しても P_{f50} としては大きく変化し、危険な設計になることがわかった。

次に P_{f50} を制御対象とするために、北野¹¹⁾が提案する波浪の極値分布形を表す汎用指標やその他の設計条件を用い、レベル1設計法における目標信頼性指標 β_{1T} を修正する手法を提案した。さらに、今回提案する手法により、簡易なレベル1設計法でありながら、下迫・高橋³⁾のレベル3設計法と比べて遜色のない、信頼度の高い設計が可能となることを示した。

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) 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.
- 5) 吉岡 健，佐貫哲朗，長尾 毅，森屋陽一：波浪の極値分布を考慮したケーソン式混成堤の滑動量に基づくレベル1信頼性設計法に関する研究，海岸工学論文集，第51巻，pp.851-855，2004.
- 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：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.
- 8) 吉岡 健，長尾 毅，森屋陽一：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，海洋開発論文集，第20巻，pp.191-196，2004.
- 9) 高田悦子，諸星一信，平石哲也，永井紀彦，竹村慎治：我が国沿岸の波浪外力の分布（海象外力検討調査），国土技術政策総合研究所資料 No.88，2003.
- 10) 合田良実・小長谷 修・永井紀彦：極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.211-215，1998.
- 11) 北野利一：極値波高分布の形状特性に対する汎用指標の提案，海岸工学論文集，第50巻，pp.211-215，2003.
- 12) 合田良実：設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義，海岸工学論文集，第49巻，pp.171-175，2002.
- 13) 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.