

波浪の統計期間に応じた防波堤の 耐波設計に用いる部分係数

PARTIAL FACTORS FOR THE DESIGN OF BREAKWATERS ACCORDING TO THE STATISTICAL DURATION OF WAVE OBSERVATION

長尾毅¹・佐貫哲朗²・吉岡健³

Takashi NAGAO, Tetsuro SANUKI and Takeshi YOSHIOKA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

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

³正会員 工修 電源開発 (株) (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

The technical standards for port and harbor facilities employs the reliability-based design method. As for the design of breakwaters, standard partial factors for wave force are shown in the technical standards based on the assumption of the coefficient of variation of estimation accuracy of deepwater wave height as 0.1. However, the recent research showed that the coefficient of variation of estimation accuracy of deepwater wave height changes in accordance with the statistical duration of wave observation. Therefore, partial factors for wave force to be used in the design of breakwaters need to be evaluated properly according to the statistical duration of wave observation. This study aims at proposing the method of setting partial factors for wave force in accordance with the statistical duration of wave observation considering the effect of variation of the estimation accuracy of deepwater wave height on wave force.

Key Words : Breakwater, reliability-based design, partial factors, statistical duration of wave observation

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準が改正され、信頼性設計法が導入された¹⁾。防波堤の耐波設計では、確率的にキャリブレーションされた部分係数の標準値が示されている。波力の部分係数は、様々な要因のばらつきを考慮した上で設定されており、このうち設計沖波波高の推定精度（真の値と設計で用いる値の比）については、平均値の偏りなし（特性値は平均値と一致）、変動係数が0.1と推定された結果が部分係数の設定に用いられている。しかしながら、この設計沖波波高の推定精度は特に検証した結果を踏まえて設定されたものではなく、特に変動係数については、波浪の統計期間によって異なることが示されている²⁾。

波力の推定精度は(A)沖波波高推定精度、(B)波浪変形計算精度、(C)砕波変形推定精度、(D)波力算定式推定精度の4つの設計因子が関係しており、各々の平均値の偏り（平均値と特性値の比）および変動係数が既往の研究において明らかとなっている。しかしながら、これら(A)～(D)の各項目を踏まえて最終的に波力に用いる部分係数を提案した研究³⁾において、各項目の影響をどのように扱って部分係

数が設定されたのかについては明瞭な情報が示されていない。このため、設計沖波波高推定精度がこれまでの設定値と異なった場合に、どのように波力に用いる部分係数を変化させれば良いのかが明らかではない。また、設計沖波波高の推定精度のみならず、他の因子の確率分布が変化した場合にも同様の問題が生じることになる。

以上の背景のもと、本研究では、防波堤の耐波設計において波浪の統計期間を考慮した部分係数の設定方法の提案を行うことを目的とし、(A)～(D)の4項目の平均値・変動係数と波力推定精度の平均値・変動係数の関係を明らかにすることにより、項目(A)の変化に伴う部分係数の変化のさせかたを示した。

2. 波力推定精度のばらつき

(1) 波力推定精度の平均値の偏り

既往の研究成果による(A)～(D)の各項目の推定精度を表-1に示す。また、防波堤の構造形式ごとの波力の推定精度の標準値を表-2に示す。表-1および表-2におけるBは平均値の偏り（平均値/特

性値)， V はその変動係数を表す。

表-1 波力に関する設計因子の従う確率分布⁴⁾

	B	V
沖波波高推定精度： v_A	1.000	0.100
波浪変形計算精度： v_B		
水深変化緩	0.970	0.041
水深変化急	1.060	0.085
砕波変形推定精度： v_C	0.870	0.103
波力算定式推定精度： v_D		
ケーソン式混成堤	0.910	0.187
消波ブロック被覆堤	0.840	0.119
上部斜面堤	0.960	0.177
直立消波ブロック堤	0.970	0.175
消波ケーソン堤	0.970	0.165

注) $v_A \sim v_D$ ： $A \sim D$ に関する確率変数

表-2 波力の推定精度の従う確率分布の標準値⁵⁾

	B_{P_H}	V_{P_H}
ケーソン式混成堤		
水深変化緩	0.740	0.239
水深変化急	0.825	0.251
消波ブロック被覆堤		
水深変化緩	0.702	0.191
水深変化急	0.772	0.205
上部斜面堤		
水深変化緩	0.777	0.232
水深変化急	0.868	0.243
直立消波ブロック堤		
水深変化緩	0.812	0.230
水深変化急	0.893	0.242
消波ケーソン堤		
水深変化緩	0.799	0.223
水深変化急	0.882	0.235

波力の推定精度が、(A)～(D)の4項目の積によって得られるとすると、これら4項目は独立と扱ってよいと、例えばケーソン式混成堤の水深変化緩の場合に波力の平均値の偏り B_{P_H} 及び変動係数 V_{P_H} はそれぞれ式(1)および式(2)のように得られる。

$$B_{P_H} = B_{v_A} \cdot B_{v_B} \cdot B_{v_C} \cdot B_{v_D} \quad (1)$$

$$= 1.000 \times 0.970 \times 0.870 \times 0.910 = 0.768$$

$$V_{P_H} = \sqrt{V_{v_A}^2 + V_{v_B}^2 + V_{v_C}^2 + V_{v_D}^2} \quad (2)$$

$$= \sqrt{0.100^2 + 0.041^2 + 0.103^2 + 0.187^2} = 0.239$$

この平均値は表-2の値と一致しない。よって、設計沖波波高の推定精度が標準値と異なる場合に、部分係数を新たに設定する方法は明確でないといえる。

一致しない理由を考察する。合田式による場合、波力合力は最高波高 $H_{\max}$ の関数として式(3)のように表すことが出来る。

$$P_H = c_1 H_{\max} - c_2 \quad (3)$$

ここに、 c_1 、 c_2 ：定数である。また、 $H_{\max}$ については(A)～(C)の因子の積の特性を有する確率変数(E)として取り扱うことができ、式(4)および式(5)のように表すことが出来る。

$$B_{v_E} = B_{v_A} \cdot B_{v_B} \cdot B_{v_C} \quad (4)$$

$$V_{v_E} = \sqrt{V_{v_A}^2 + V_{v_B}^2 + V_{v_C}^2} \quad (5)$$

したがって、確率変数としての波力は式(6)のように表現されることになる。

$$P_H(v_D, v_E) = v_D \{c_1 H_{\max}(v_E) - c_2\} \quad (6)$$

ここで、式(6)に定数項があるため、波力の平均値の偏りは設計事例ごとにばらつきを有することになる。図-1に既往の部分係数のコードキャリブレーションで用いられた設計事例のうち、水深変化緩の場合の波力の平均値の偏りのヒストグラムを示す。

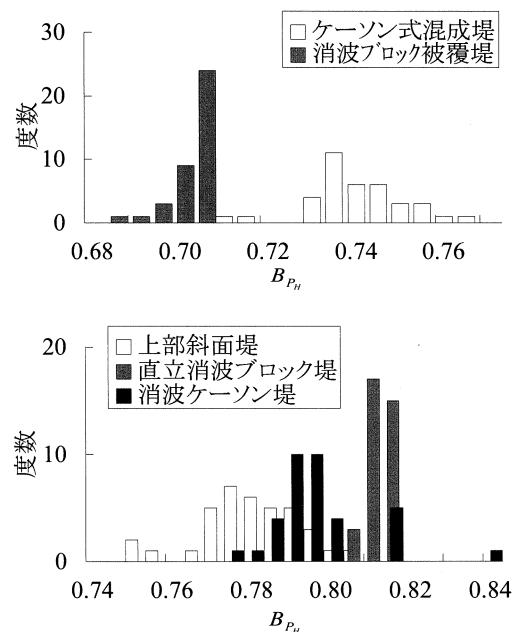


図-1 波力の平均値の偏りのヒストグラム
(水深変化緩の場合)

(2) 設計沖波波高推定精度のばらつき

全国の港湾から抽出した代表的な18種類の極値分布をもとに実施されたモンテカルロシミュレーションの結果、統計期間ごとの設計沖波波高推定精度として表-3が得られている²⁾。平均値の偏りは統計期間によらず概ね1.0であり、変動係数は、統計期間30年で概ね標準値の0.1となる。

表-3 沖波波高推定精度²⁾

統計期間	10年	20年	30年	40年	50年
B_{v_A}	1.010	1.003	1.001	1.000	1.000
V_{v_A}	0.174	0.124	0.102	0.088	0.079

(3) 波浪の統計期間に応じた波力のばらつき

式(3)および式(6)より、波力推定精度の平均値の偏りと変動係数は式(7)および式(8)のように表現できる。

$$B_{P_H} = \frac{\mu_{P_H}}{P_{H_k}} = \frac{B_{v_D} (c_1 B_{v_E} H_{\max k} - c_2)}{c_1 H_{\max k} - c_2} \quad (7)$$

$$V_{P_H} = \frac{\sigma_{P_H}}{\mu_{P_H}} = \frac{\sqrt{(B_{v_D} c_1 \sigma_{v_E} H_{\max k})^2 + \{\sigma_{v_D} \cdot (c_1 B_{v_E} H_{\max k} - c_2)\}^2}}{B_{v_D} (c_1 B_{v_E} H_{\max k} - c_2)} \quad (8)$$

ここに、 μ ：各確率変数の平均値、 σ ：各確率変数の標準偏差、 P_{H_k} ：波力の特性値、 $H_{\max k}$ ：最高波高の特性値である。既往の部分係数のコードキャリブレーションで用いられた設計事例についてそれぞれ未知数 c_1 、 c_2 を求め、さらに、得られた c_1 、 c_2 と表-3に示した統計期間ごとの設計沖波波高推定精度を基にして、波浪の統計期間に応じた波力の変動係数を求めた。結果を図-2に示す。なお、設計沖波波高の平均値の偏りは、統計期間によらず全て1.0とした。

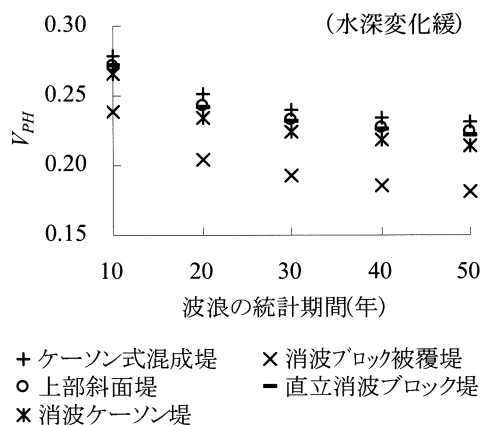


図-2 波浪の統計期間と波力の変動係数の相関

3. 波浪の統計期間に応じた部分係数

(1) 統計期間ごとの波力推定精度の近似式

波浪の統計期間に応じた部分係数の設定方法を示すため、変動係数の式を式(9)のように変形し、 $f(V_{v_E})$ の関数近似を行った。

$$V_{P_H} = \sqrt{V_{v_D}^2 + V_{v_E}^2 \{f(V_{v_E})\}^2} \quad (9)$$

構造形式および水深変化ごとに $f(V_{v_E})$ の回帰分析を行い式(10)の回帰式を得た。

$$f(V_{v_E}) = a \cdot X^b \quad (10)$$

ここに、 a 、 b ：係数、 X ：統計期間（年）である。

水深変化緩の場合の回帰曲線を図-3(a)～(e)に、構造形式ごとの係数 a および b の一覧を表-4に示す。

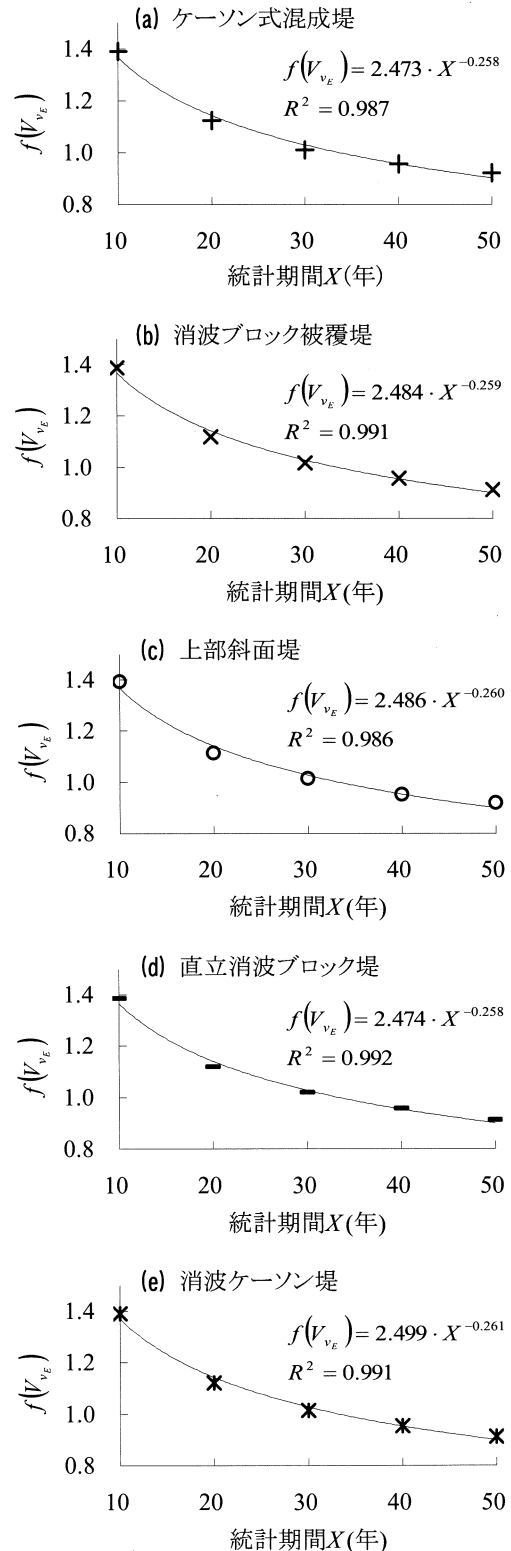


図-3 $f(V_{v_E})$ の回帰分析結果（水深変化緩の場合）

表-4 $f(V_{v_E})$ 近似式の係数

	a	b
ケーソン式混成堤		
水深変化緩	2.473	-0.258
水深変化急	2.121	-0.215
消波ブロック被覆堤		
水深変化緩	2.484	-0.259
水深変化急	2.127	-0.215
上部斜面堤		
水深変化緩	2.486	-0.260
水深変化急	2.128	-0.216
直立消波ブロック堤		
水深変化緩	2.474	-0.258
水深変化急	2.142	-0.218
消波ケーソン堤		
水深変化緩	2.499	-0.261
水深変化急	2.128	-0.216

$f(V_{v_E})$ の回帰式を用いることにより得られた波力の変動係数の近似結果を図-4に示す。近似精度は高く、式(5)、式(9)および式(10)により任意の統計期間における波力の変動係数を精度よく得ることが出来ると考えられる。

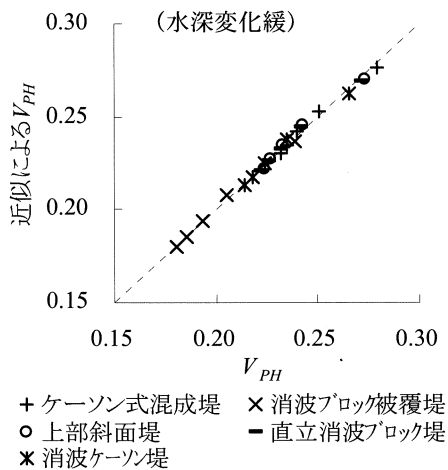


図-4 V_{P_H} の近似結果

次に、波力の平均値の偏りについて検討する。本研究で扱う設計沖波波高の推定精度の平均値の偏りは表-3に示したとおり統計年数によらず概ね1.0であるため、統計年数の変化に伴う平均値の偏りの変化が部分係数に及ぼす影響は無視できると考えられる。しかしながら、上述の通り現状では他の因子の確率分布が変化した場合などに波力の部分係数の変更の仕方が不明であるため、具体的な方法について検討しておく。式(7)を変形することにより、式(11)が得られる。

$$B_{P_H} = \frac{B_{v_D} B_{v_E} (c_1 H_{\max k} - c_2) + c_2 B_{v_D} (B_{v_E} - 1)}{c_1 H_{\max k} - c_2} \quad (11)$$

$$= B_{v_D} \{ (1 + c_3) B_{v_E} - c_3 \}$$

よって、因子の平均値の偏りが変化したときは、式(11)を用いて波力の平均値の偏りを再評価し、部分係数に反映させれば良いと考えられる。

既往の部分係数のコードキャリブレーションで用いられた事例について、構造形式ごとに式(11)により算定した c_3 の値の平均値を表-5に示す。

表-5 近似式の係数

	水深変化緩	水深変化急
ケーソン式混成堤	0.197	0.200
消波ブロック被覆堤	0.053	0.042
上部斜面堤	0.224	0.230
直立消波ブロック堤	0.045	0.022
消波ケーソン堤	0.129	0.163

(2) 統計期間ごとの部分係数

前節までに得られた結果を基に、式(12)により算定した波浪の統計期間に応じた波力の部分係数を表-6に示す。

$$\gamma = (1 - \alpha \beta_T V) B \quad (12)$$

ここに、 γ ：部分係数、 α ：感度係数、 β_T ：目標信頼性指標である。

ケーソン式混成堤を例とした結果を図-5に示す。統計期間が30年～40年より短い場合には技術基準の標準値より大きく、長い場合には標準値より小さくなっており、統計期間の違いが適切に反映されているものと考えられる。

なお、表-6において統計期間が30年の場合の部分係数の値が、港湾基準に示された値と異なる場合が一部存在する。ただし、その違いは僅かであり、かつ統計期間が30年の場合には沖波波高推定精度の変動係数は港湾基準の設定と概ね一致していることから、波浪の統計期間が30年程度の場合には、港湾基準に示された部分係数を用いて問題はないものと考えられる。

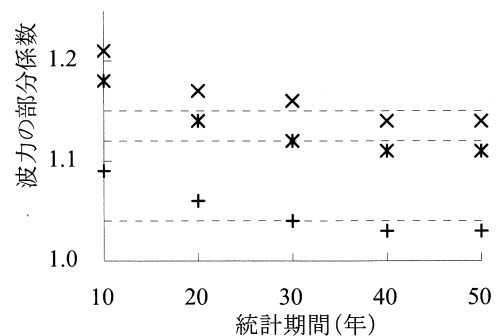


図-5 部分係数算定結果
(ケーソン式混成堤、水深変化緩)

表-6 波浪の統計期間を考慮した波力の部分係数

			β_T	α	B	γ				
						10 年	20 年	30 年	40 年	50 年
ケーソン式 混成堤	滑 動	水深変化緩	2.40	-0.704	0.740	1.09	1.06	1.04	1.03	1.03
		水深変化急			0.825	1.22	1.19	1.18	1.17	1.16
	転 倒	水深変化緩		-0.968	0.740	1.21	1.17	1.16	1.14	1.14
		水深変化急			0.825	1.37	1.33	1.31	1.30	1.29
	支持力	水深変化緩		-0.894	0.740	1.18	1.14	1.12	1.11	1.11
		水深変化急			0.825	1.33	1.29	1.27	1.26	1.25
消波ブロック 被覆堤	滑 動	水深変化緩	2.40	-0.636	0.702	0.95	0.92	0.91	0.90	0.89
		水深変化急			0.772	1.06	1.03	1.02	1.01	1.00
	転 倒	水深変化緩		-0.962	0.702	1.08	1.04	1.02	1.00	0.99
		水深変化急			0.772	1.21	1.17	1.14	1.13	1.12
	支持力	水深変化緩		-0.842	0.702	1.04	1.00	0.98	0.97	0.96
		水深変化急			0.772	1.16	1.12	1.10	1.08	1.07
上部斜面堤	滑 動	水深変化緩	2.24	-0.670	0.777	1.09	1.06	1.05	1.04	1.04
		水深変化急			0.868	1.23	1.20	1.19	1.18	1.17
	転 倒	水深変化緩		-0.970	0.777	1.23	1.19	1.17	1.16	1.15
		水深変化急			0.868	1.39	1.35	1.33	1.32	1.31
	支持力	水深変化緩		-0.872	0.777	1.19	1.15	1.13	1.12	1.11
		水深変化急			0.868	1.34	1.30	1.29	1.27	1.26
直立消波 ブロック堤	滑 動	水深変化緩	2.12	-0.708	0.812	1.14	1.11	1.10	1.09	1.08
		水深変化急			0.893	1.27	1.24	1.22	1.21	1.20
	転 倒	水深変化緩		-0.974	0.812	1.26	1.22	1.20	1.19	1.18
		水深変化急			0.893	1.41	1.37	1.34	1.33	1.32
	支持力	水深変化緩		-0.856	0.812	1.21	1.17	1.16	1.15	1.14
		水深変化急			0.893	1.35	1.31	1.29	1.28	1.27
消波 ケーソン堤	滑 動	水深変化緩	2.10	-0.732	0.799	1.12	1.09	1.08	1.07	1.06
		水深変化急			0.882	1.25	1.22	1.20	1.19	1.19
	転 倒	水深変化緩		-0.971	0.799	1.23	1.19	1.17	1.15	1.15
		水深変化急			0.882	1.37	1.33	1.31	1.30	1.29
	支持力	水深変化緩		-0.852	0.799	1.17	1.14	1.12	1.11	1.10
		水深変化急			0.882	1.31	1.27	1.26	1.24	1.24

4. 波浪の極値分布形状を考慮した部分係数

設計沖波波高の推定精度に強い影響を及ぼす因子として、波浪の統計期間とともに波浪の極値統計分布形状があげられる²⁾。このため、波浪の統計期間のみならず波浪の極値分布形状が明らかな場合は、3. における議論よりもさらに合理的に部分係数を設定出来る可能性がある。ここでは、波浪の極値分布形状に関する指標として、50 年確率波高と 10 年確率波高 (H_{10}) の比である裾長さ⁶⁾ ($\gamma_{50}=H_{50}/H_{10}$) をもとにした検討を行う。

実際の波浪の極値統計解析においては真の極値分布形状は未知である。よって、長尾・佐貫²⁾におけるモンテカルロシミュレーションの結果を用いて、 γ_{50} の推定値に対する設計沖波波高推定精度の変動係数の関係を検討した。ここで、モンテカルロシミュレーションにおいては一定の γ_{50} が算出されるわけではないので、算出された γ_{50} を1.1~1.5の範囲で0.05刻みに区分し、各区分において設計沖波波

高の推定精度を算出してこれをもとに変動係数を設定した。一例として統計期間30年の条件で、 γ_{50} が1.2程度の場合と1.4程度の場合の頻度分布を図-6に示す。また、全ての条件における γ_{50} の推定値に対する設計沖波波高の変動係数の関係を図-7に示す。なお、これらの結果は、極値統計解析のモンテカルロシミュレーション結果のうち、18種類の真の極値分布各々について1000試行を抽出し、計18000個のデータをもとに検討を行ったものである。

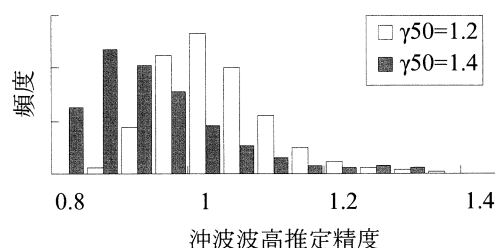


図-6 設計沖波波高推定精度の頻度分布

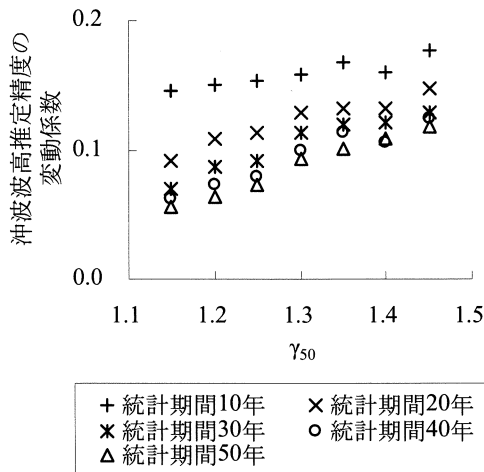


図-7 γ_{50} 推定値と沖波波高推定精度の変動係数の相関

図-7 の関係から設計沖波波高の推定精度の変動係数を近似式として表現した。具体的には、統計期間ごとに変動係数を γ_{50} の関数で近似 (式 (13)) し、さらに係数 a, b を統計期間で近似 (式 (14)) した。

$$V_{vA} = a \cdot \gamma_{50} + b \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= c \cdot X^2 + d \cdot X + e \\ b &= f \cdot X^2 + g \cdot X + h \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここに、 $c \sim h$ は以下に示す定数である。
 $c = -1.050 \times 10^{-4}$, $d = 9.130 \times 10^{-3}$, $e = 1.560 \times 10^{-2}$,
 $f = 1.879 \times 10^{-4}$, $g = -1.666 \times 10^{-2}$, $h = 1.804 \times 10^{-1}$
 近似式の精度を図-8 に示す。

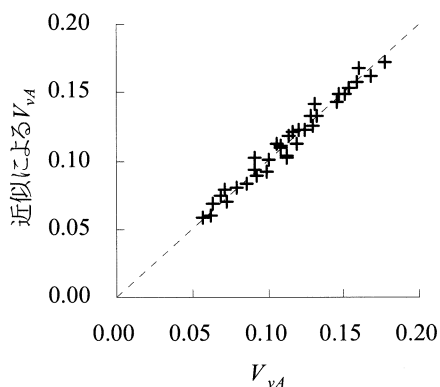


図-8 沖波波高推定精度の近似結果

波浪の極値分布形状を考慮した沖波波高推定精度を部分係数へ適用する方法を以下に示す。設計沖波波高の算定の基となった極値統計の統計期間に応じて式 (14) により係数 a および b を算定し、得られた係数 a, b および設計沖波波高の極値分布における γ_{50} を用いて式 (13) により設計沖波波高の推定精度の変動係数 V_{vA} を算出する。得られた V_{vA} と表-1 に示す $V_{vB} \sim V_{vC}$ を用いて式 (2) により波力の推定精度の変動係数 V_{pH} を算出する。得られた V_{pH} を用いて

式 (12) により部分係数の算定を行う。表-7 にケーソン式混成堤、水深変化緩における滑動の部分係数算定例を示す。

表-7 波浪の極値分布を考慮した波力の部分係数
(ケーソン式混成堤、水深変化緩、滑動)

		統計期間				
		10 年	20 年	30 年	40 年	50 年
γ_{50}	1.15	1.07	1.04	1.03	1.02	1.02
	1.20	1.07	1.05	1.03	1.03	1.03
	1.25	1.07	1.05	1.04	1.03	1.03
	1.30	1.08	1.05	1.04	1.04	1.03
	1.35	1.08	1.06	1.05	1.04	1.04
	1.40	1.08	1.06	1.05	1.05	1.05
	1.45	1.09	1.07	1.06	1.05	1.05
	1.50	1.09	1.07	1.06	1.05	1.05

5. まとめ

本研究では、代表的な構造形式の防波堤について、波浪の統計期間に応じた波力の平均値の偏りと変動係数の算定方法を示し、部分係数の提案を行った。なお、波浪の統計期間が 30 年程度の場合には、港湾基準に示された部分係数を用いて問題はないものと考えられる。

本研究の手法は、波浪の統計期間の変化のみならず、それ以外の要因が標準値と異なる場合についても適用可能である。さらに、極値分布形状が沖波波高の推定精度に及ぼす影響が大きいことから、波浪の統計期間と 50 年確率波高と 10 年確率波高の比 γ_{50} をもとにした部分係数の算定方法を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007。
- 2) 長尾毅，佐貫哲朗：波浪の統計期間と設計沖波波高の推定精度の相関に関する研究，海洋開発論文集，第 25 巻，2009（投稿中）。
- 3) 吉岡健，長尾毅：重力式防波堤の外的安定に関するレベル 1 信頼性設計法の提案，国土技術政策総合研究所研究報告，第 20 号，2005。
- 4) 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。
- 5) 吉岡健，長尾毅，鷲尾朝昭，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。
- 6) 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。