

複数の構造的特徴を有する重力式防波堤の 部分係数設定方法に関する研究

A Method for Setting Partial Factors of Gravity-type Breakwaters with Two or More Structural Features

宮脇周作¹・長尾 毅²

Shusaku MIYAWAKI, Takashi NAGAO

It is important to evaluate the estimation accuracy of wave pressure appropriately by experiment or field observation result in order to set the partial factors for gravity-type breakwaters. However, there are only a few experimental examples on gravity-type breakwaters with two or more structural features developed in recent years. In this study, taking breakwaters with wave-dissipating blocks having the slant superstructure as an example, we showed the method for evaluating the estimation accuracy of wave pressure of the gravity-type breakwater with two or more structural features by using that of the gravity-type breakwater of each feature. We furthermore proposed the partial factors for breakwaters with wave-dissipating blocks having the slant superstructure by the reliability analysis.

1. はじめに

港湾の技術基準の性能規定化に伴い、重力式防波堤の外的安定性の標準的な照査方法は、従来の安全率法からレベル1信頼性設計法（部分係数法、以下、レベル1設計法と略記）に移行している。レベル1設計法は、信頼性設計法の中でも最も平易な設計法で、部分係数を用いた安全性照査式によって安全性を評価する方法である。重力式防波堤の部分係数は、既往の研究（吉岡ら、2005）により、一般的な5形式（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）についての標準値が提示されている。しかし、これら以外の形式に関する部分係数は、新たに算出する必要がある。部分係数の算出においては、波力算定式の推定精度の評価を適切に行うことが重要となる。この波力算定式推定精度は、波力算定式による計算値と、現地観測や水理模型実験の結果を用いて評価されるが、近年開発された、複数の構造的特徴を有するような特殊な形式の防波堤の場合、研究例が数少なく十分なデータが得られない場合が多い。

そこで本研究は、図-1に示す消波ブロック被覆上部斜面堤

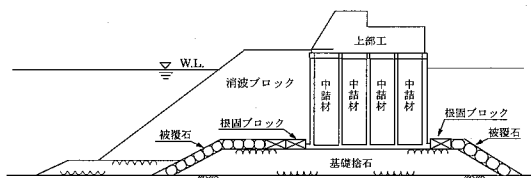


図-1 消波ブロック被覆上部斜面堤

斜面堤を例にとり、複数の構造的特徴を有する重力式防波堤の波力算定式推定精度を、その構造的特徴を個別に有する重力式防波堤の波力算定式推定精度から評価する方法について検討を行う。さらに、その結果を用いて信頼性解析を実施し、消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係数を算出した。

2. 波力算定式の推定精度

(1) 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式

消波ブロック被覆上部斜面堤は、図-1に示すように上部斜面堤を消波ブロックで被覆した重力式防波堤であり、消波ブロック被覆堤と上部斜面堤の複合形式といえる。この防波堤は、斜面効果による耐波安定性に加え、消波ブロックの被覆により波力および反射率の低減を図っている。また、直立壁堤に比べて堤体幅を縮小できるため、大水深域での施工に有利であるが、越波伝達波が増加するという欠点もある。

消波ブロック被覆上部斜面堤に作用する波圧分布の模式図を図-2に示し、波力の算定方法について以下に概説する。

まず、合田式によって、消波ブロック被覆上部斜面堤の直立壁に作用する波力 P_1 と、斜面壁を直立面に投影

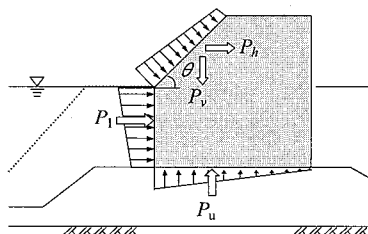


図-2 消波ブロック被覆上部斜面堤の波圧分布

1 工修 (株)日本港湾コンサルタント 技術開発部
2 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室長

した面積に作用する波力 P_2 を算出する。次に、波力 P_2 を斜面平行成分と斜面直交成分に分解し、そのうちの斜面直交成分のみが堤体に作用するというモデルのもと、水平波力 P_h 及び鉛直下向き波力 P_v を算出する。以上によって求めた斜面部の波力は、波高水深比が小さくなる場合、水理模型実験結果に比べて過小な評価となることから、佐藤ら(1992)は、 P_2 に乗じる波力割増係数 λ_{FS} を提案している(式(4)~(6))。また、直立部の波力の低減係数 λ_v は、高橋ら(1990)による消波ブロック被覆堤の波力低減係数と同様の傾向を示すことが確認されている。以上のことから消波ブロック被覆上部斜面堤に作用する波力は式(1)~(3)により求められる。

$$P_1 = \lambda_v P_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$P_h = \lambda_{FS} P_2 \sin 2\theta \dots\dots\dots (2)$$

$$P_v = 0.5 \lambda_{FS} P_2 \sin 2\theta \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P_0 は合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち消波ブロック被覆上部斜面堤の直立部に対応する部分 (kN/m)、 P_1 は消波ブロック被覆上部斜面堤の直立部に作用する波力 (kN/m)、 P_2 は合田式で計算される直立壁に作用する波力のうち消波ブロック被覆上部斜面堤の斜面部に対応する部分 (kN/m)、 P_h は斜面部に作用する波力の水平成分 (kN/m)、 P_v は斜面部に作用する波力の鉛直成分 (kN/m)、 θ は斜面部の勾配 (°)、 λ_v は消波ブロック被覆堤の波力低減係数を示す。 λ_{FS} は斜面部に作用する波力の割増係数で次式により求められる。

$$\lambda_{FS} = \begin{cases} 2.0 & ; (H_{\max}/h \leq 0.35) \dots\dots\dots (4) \\ -10H_{\max}/(3h) + 19/6 & ; (0.35 \leq H_{\max}/h \leq 0.65) \dots\dots\dots (5) \\ 1.0 & ; (0.65 \leq H_{\max}/h) \dots\dots\dots (6) \end{cases}$$

ここに、 $H_{\max}$ は最高波高 (m)、 h は直立壁前面での水深 (m) を示す。

(2) 推定精度の評価

吉岡ら(2005)は既往の研究事例を収集し、水理模型実験による波力の実験値 P_E と波力算定式による計算値 P_C との比によって、一般的な防波堤形式の波力算定式推定精度を評価している。しかし、消波ブロック被覆上部斜面堤の水理模型実験の実施例は数少なく、波力算定式推定精度を適切に評価するためのデータが不足しているのが現状である。そこで、本研究ではまず、消波ブロック被覆上部斜面堤の2つの構造的特性(消波ブロック被覆特性、上部斜面特性)を個別に有する防波堤である、消波ブロック被覆堤、上部斜面堤のうち、上部斜面堤の波力算定式(細山田ら, 1994, 式(7)~(9))に注目する。

$$P_1' = \lambda_v P_0 \dots\dots\dots (7)$$

$$P_H = \lambda_{SL}' P_2 \sin 2\theta \dots\dots\dots (8)$$

$$P_V' = 0.5 \lambda_{SL}' P_2 \sin 2\theta \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 P_1' は上部斜面堤の直立部に作用する波力 (kN/m)、 P_H は斜面部に作用する波力の水平成分 (kN/m)、 P_V' は斜面部に作用する波力の鉛直成分 (kN/m)、 P_0 、 P_2 、 θ については式(1)~(3)におけるものと同じである。 λ_{SL}' 、 λ_v は斜面部および直立部に作用する波力の補正係数で式(10)、(11)により求められる。

$$\lambda_v = \min[1.0 \max\{1.1, 1.1 + 11d_c/L\} - 5.0H/L] \dots\dots\dots (10)$$

$$\lambda_{SL}' = \min[\max\{1.0, -23H/L \tan^{-2}\theta + 0.46 \tan^{-2}\theta + \sin^{-2}\theta\} \sin^{-2}\theta] \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 H は波高 (m)、 L は波長 (m)、 d_c は斜面下端から静水面までの高さ (m) を示す。

式(7)~(9)によると、上部斜面堤の直立部、斜面部の波力は、合田式により計算されるケーソン式混成堤の波力 P_0 、 P_2 に、波力の補正係数 λ_v 、 λ_{SL}' を乗じる形で求められる。このことから、上部斜面堤の波力算定式の確率分布は、ケーソン式混成堤の波力算定式の確率分布と、上部斜面堤の波力補正係数の確率分布との積の関係で求められ、波力 X および波力の補正係数 Y を互いに独立な確率変数と考えると、両者の積 XY の平均値と変動係数は、式(12)、(13)により算出される。

$$\mu_{XY} = \mu_X \cdot \mu_Y \dots\dots\dots (12)$$

$$V_{XY} = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 μ は平均値、 V は変動係数(標準偏差/平均値)を示す。

ここで、上部斜面堤の波力補正係数は、上部斜面構造を有する防波堤の、波力算定式の特性を表しているものと考えられる。このことから、消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式の確率分布は、上部斜面堤の波力補正係数の確率分布と、消波ブロック被覆堤(斜面部は消波ブロックで被覆されていないためケーソン式混成堤)の波力算定式の確率分布を、式(12)、(13)を用いて合成することにより評価できると考えられる。

以上より、次項ではまず、上部斜面堤の斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を評価する。次に、上部斜面堤の波力の補正係数の推定精度を評価し、消波ブロック被覆上部斜面堤およびケーソン式混成堤の波力算定式推定精度を用いて消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度を評価する。なお、斜面部に作用する波力の鉛直成分と水平成分は同様の確率分布に従うことから、斜面部の波力算定式推定精度は斜面部に作用する波力の水平成分で評価している。

a) 上部斜面堤の波力算定式推定精度

上部斜面堤の波力の実験値 P_E と波力算定式による計算値 P_C との比によって、上部斜面堤の波力算定式推定精度を斜面部、直立部に評価する。水理模型実験データは、中田ら (1983) より 2 データ、大堀ら (1986) より 13 データ、細山田ら (1994) より 4 データを収集し、計 19 データによって評価した。上部斜面堤の斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を表-1 に示す。

表-1 上部斜面堤の波力算定式推定精度

	斜面部	直立部
μ	0.60	1.04
V	0.33	0.13

注) μ : 平均値, V : 変動係数

b) 上部斜面堤の波力補正係数の推定精度

上部斜面堤の波力補正係数の推定精度は、表-1 に示す上部斜面堤の波力算定式推定精度と、ケーソン式混成堤の波力算定式推定精度 (表-4 参照), および式 (12), (13) を用いて表-2 のように評価される。なお, 上部斜面堤の直立部の波力に関する変動係数 ($V=0.13$) は、混成堤の波力に関する変動係数 ($V=0.19$) よりも小さいため、ここでは直立部の波力補正係数の推定精度のばらつきは無視して $V=0$ としている。

表-2 上部斜面堤の波力補正係数の推定精度

	斜面部	直立部
μ	0.66	1.14
V	0.27	0

注) μ : 平均値, V : 変動係数

c) 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度

表-1 に示す上部斜面堤の波力補正係数の推定精度と、ケーソン式混成堤 (斜面部), 消波ブロック被覆堤 (直立部) の波力算定式推定精度 (表-4 参照), および式 (12), (13) を用いて消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度は表-3 のように評価される。

ここで、表-3 に示す、斜面部、直立部別の波力算定式推定精度を、斜面部および直立部に作用する波力の比を用いて案分することにより、波圧作用面全体 (斜面部 + 直立部) の波力算定式推定精度を評価し表-4 に示す。なお、ここで用いる波力の比は、表-1 に示す上部斜面堤の波力算定式推定精度を評価する際に用いた計算波力

表-3 消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度

	斜面部	直立部
μ	0.60	0.96
V	0.33	0.12

注) μ : 平均値, V : 変動係数

表-4 波力算定式推定精度

構造形式	B	V
消波ブロック被覆上部斜面堤	0.89	0.11
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

注) B : 平均値の偏り (平均値 / 特性値), V : 変動係数

から求めた値である。表-4 には比較のため、既往の研究 (Takayama ら, 1997; 吉岡ら, 2005) による一般的な 5 形式についての値も併記しているが、消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式推定精度の平均値の偏りは、他の形式と比較して小さく、消波ブロック被覆堤と同程度の値となっている。このことから、消波ブロック被覆形式の防波堤には、安全性の余裕度が比較的大きく見込まれていることがわかる。また、変動係数に関しても消波ブロック被覆形式の値が、他の形式と比較して小さくなっている。波力算定式による波力推定時のばらつきの程度には、砕波圧や衝撃砕波圧の推定精度が大きく寄与するものと考えられるため、これらの影響をほとんど受けない消波ブロック被覆形式のみ、波力算定式推定精度の変動係数が小さくなっているものと考えられる。

3. 信頼性解析

(1) 解析方法の概要

信頼性解析は、波力算定式推定精度 (表-4) および長尾 (2001) が用いた設計因子の従う確率分布をもとに、滑動、転倒、基礎の支持力破壊に対して、破壊点周りのテラー展開に基づく 1 次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) によって、信頼性指標 β を算出する。

検討ケースには、全国広範囲より設計条件的に偏りがないように収集した 41 ケースを用いた。なお、消波ブロック被覆上部斜面堤の建設事例は数少なく十分な事例数が入手困難であったため、長尾 (2001) によって収集されたケーソン式混成堤の設計条件をこれに適用して、検討ケースに追加した。

解析はまず、各ケースについて現行設計法 (許容滑動安全率 1.2, 許容転倒安全率 1.2, 許容支持力安全率 1.0) による試設計を実施し、設計された断面について各破壊モードの信頼性指標を計算した。次に、各破壊モードの信頼性指標を用いてシステム信頼性指標 β_{sys} を計算し、その値を目標値として消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係数を算出した。なお、詳細な解析方法は参考文献 (吉岡ら, 2005) を参照されたい。

(2) 現行設計法による安全性水準

現行設計法による設計断面の、各破壊モードに対する

表-5 システム信頼性指標

構造形式	平均 値		標準偏差	
消波ブロック被覆 上部斜面堤	2.63		0.37	
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	

信頼性指標 β (全事例の平均値) はそれぞれ、滑動 β が 2.64, 転倒 β が 5.43, 基礎の支持力 β が 5.64 となった。滑動破壊モードの信頼性指標が最も小さく滑動が支配的な破壊モードとなることがわかる。表-5 には各破壊モードの信頼性指標を用いて算出したシステム信頼性指標 (全事例の平均値) を示す。同表には比較のため、既往の研究 (吉岡ら, 2005) による一般的な 5 形式の値を併記しているが、消波ブロック被覆形式の防波堤 (消波ブロック被覆堤, 消波ブロック被覆上部斜面堤) のシステム信頼性指標が他の形式と比較して高い値を示している。これは、波力算定式に見込まれている余裕度が他の形式と比較して大きい (表-4 参照) ことが要因と考えられる。

4. 部分係数の算出

レベル 1 信頼性設計法における部分係数 γ_x は次式によって算出される。

$$\gamma_x = (1 - \alpha_x \beta_T V_x) B_x \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 β_T は目標信頼性指標、 V_x 、 B_x はそれぞれ確率変数 X の変動係数と平均値の偏り (平均値と特性値の比)、 α は感度係数を示す。感度係数は各設計因子が構造物の安全性に及ぼす影響の度合いを示す係数である。

各設計因子 (確率変数) 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。

ここで、表-5 に示す消波ブロック被覆堤上部斜面堤の平均システム信頼性指標は 2.63 であるが、ここでは、一般的な防波堤形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤の平均システム信頼性指標 2.38 を目標値 β_T とする。

目標信頼性指標は、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式 (14) における目標値となる。しかしながら、本問題のように、事象が複数破壊モードの和事象で定義される直列システムの場合には、システム信頼性指標の平均値 β_{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 β_{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 β_{T_sys} を下

回るからである。そのため本研究では、吉岡ら (2005) にならない、まず、FORM により β_{T_sys} を満足する断面を決定して、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、これを全事例について平均して式 (14) に用いる目標値 β_T とした。この方法により得られた消波ブロック被覆上部斜面堤の信頼性指標 β_T は 2.46 となり、 β_{T_sys} (=2.38) よりも若干高い値となった。

感度係数は、各破壊モード別に β_T を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た。図-3 は、この方法によって算出した感度係数の全事例の平均値を滑動、基礎の支持力破壊モードについて示したものである。

ここで、図中の P_H は水平波力、 P_U は揚圧力、 f は摩擦係数、 wl は潮位、 W は堤体重量を示し、添え字 RC, NC, SAND はそれぞれ鉄筋コンクリート、無筋コンクリート、中詰砂を示す。また、 q は上載荷重、 w' は分割細片重量、 ϕ はせん断抵抗角、 c' は粘着力を示す。同図には比較のため、吉岡ら (2005) による上部斜面堤の感度係数を併記しているが、消波ブロック被覆上部斜面堤は、上部斜面堤と比較して、水平波力・揚圧力、および上載荷重の感度が低いことがわかる。消波ブロック被覆上部斜面堤は、消波ブロックの被覆効果により揚圧力が低減され、斜面部に作用する鉛直下向波力と打ち消し合う傾向にあるためと考えられる。また、上載荷重の感度係数は水平波力との相関を考慮しているが、同様の理由

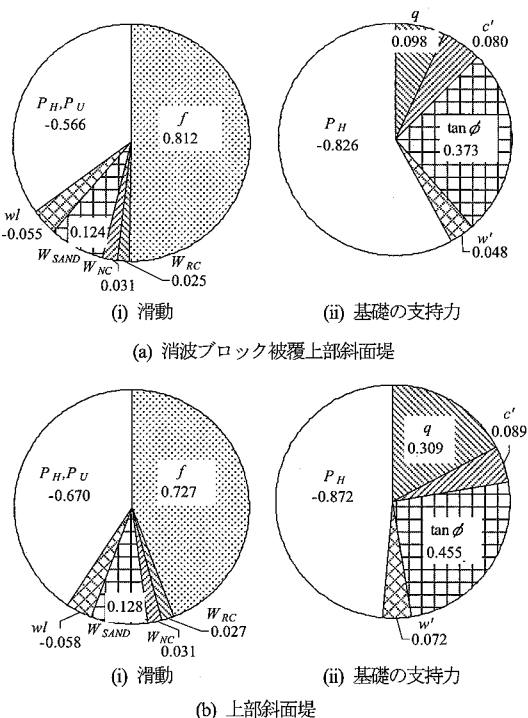


図-3 感度係数

表-6 部分係数(滑動破壊モード)

滑 動	f	γ
	P_H, P_U 水深変化 緩	0.74
	水深変化 急	0.93
	$r_{wl}=1.5$	1.04
	$r_{wl}=2.0, 2.5$	1.03
	H.H.W.L.	1.05
	W_{RC}	1.00
	W_{NC}	0.98
	W_{SAND}	1.02
		1.01

※ r_{wl} = 既往最高潮位 / さく望平均満潮位

により相関係数が小さくなり、これに伴い感度係数も小さくなっているものと考えられる。

以上の検討により得られた目標信頼性指標、各設計因子の確率分布、感度係数を用い、式 (14) によって算出した消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係数(滑動破壊モード)を表-6に示す。

図-4は、本研究により算出した部分係数を用いたレベル1設計法と、現行設計法が保有するシステム信頼性指標 β_{sys} のばらつきを比較したものである。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ことがわかる。また、平均値は2.39であり、目標値2.38とほぼ同じ値を示している。図-5にはレベル1設計法と現行設計法に

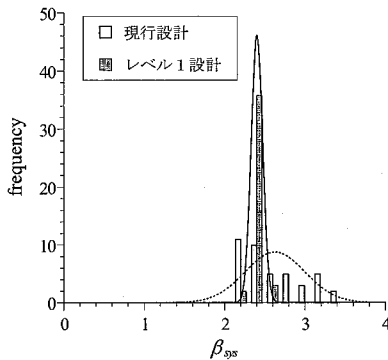


図-4 システム信頼性指標のばらつき

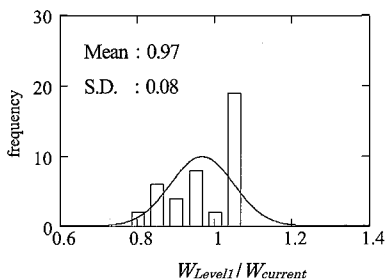


図-5 堤体重量比の分布

よる設計結果の堤体重量比(レベル1設計/現行設計)のヒストグラムを示す。堤体重量比は80%~100%程度に分布しており、平均値は97%である。これは、レベル1設計法の適用により現行設計法と同程度のコストもしくは若干のコスト縮減となることを示している。なお、図-4、図-5中の実線および点線は、それぞれの結果に正規分布をあてはめたものである。

5. ま と め

- ①本研究では、消波ブロック被覆上部斜面堤を例にとり、複数の構造的特徴を有する重力式防波堤の波力算定式推定精度を、その特徴を個別に有する防波堤の波力算定式推定精度を用いて評価する方法を示した。
- ②評価した消波ブロック被覆上部斜面堤の波力算定式を用いて信頼性解析を行い、消波ブロック被覆上部斜面堤の部分係数を算出した。算出した部分係数を用いてレベル1信頼性設計を行えば、現行設計と同程度のコストもしくは若干のコスト削減となり、かつ、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であることを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、沖縄総合事務局開発建設部から消波ブロック被覆上部斜面堤の設計事例を提供して頂きました。また、電源開発(株)吉岡健氏(前国土技術政策総合研究所 交流研究員)には終始ご指導頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 大堀晃一・森川雅行・大野光嘉・石田国夫(1986)：上部斜面堤に作用する波力に関する実験的研究，第33回海講論文集，pp. 357-361。
- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三(1992)：消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性—那覇港大水深域における新構造防波堤の開発—，海工論文集，第39巻，pp. 556-560。
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎(1990)：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，Vol. 29, No. 1, pp. 53-75。
- 長尾 毅(2001)：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用，土木学会論文集，No. 689, I -57, pp. 173-182。
- 中田邦夫・池田龍彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆(1983)：上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験，第30回海講論文集，pp. 313-316。
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利(1994)：離島港湾における上部斜面堤の適用性について，海工論文集，第41巻，pp. 706-710。
- 吉岡 健・長尾 毅(2005)：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，No. 20。
- Takayama, T. and N. Ikeda (1993) : Estimation of Sliding Failure Probability of Present Breakwaters for Probabilistic Design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 31, No. 5, pp. 3-32。