

越波流量の推定誤差を考慮した護岸の機能設計法について

殿 最 浩 司*・高山 知 司**・井上 雅 夫***・田 中 克 彦****

本研究は、越波流量の推定誤差を考慮した海岸・港湾護岸の機能設計法の確立を図ることを目的として、越波流量の推定誤差分布について検討するとともに、その結果を用いてモンテカルロ法によって耐用期間中の期待被害額（越波による浸水被害）を算定し、それに初期建設費を加えた期待総費用を最小とする設計手法を提案した。また、この手法を用いてモデル護岸に対して試算を行った。その結果、期待総費用が最小となる最適な護岸断面は、護岸背後の資産額や沖波の出現特性によって変化し、この手法を用いることによって、護岸の機能設計を合理的に行うことが可能になることがわかった。

1. はじめに

現在、海岸・港湾護岸の機能設計に際しては、計画波浪等を基にして平均越波流量を推定し、それが護岸背後の土地利用状況等から設定した許容越波流量以下になるように、護岸構造や護岸天端高等を決定する手法が用いられている場合が多い。また、最近では、いくつかの高波・高潮の設計レベルに対して、どのような機能性能を有しているのか評価する性能設計法の考え方が提案されている（高橋ら, 2002）。これらの設計法は、来襲する外力は確定論的に扱っており、ばらつきなど変動性を考慮していない。しかし、越波現象は水理学的にみても、ばらつき（推定誤差）の大きい現象であることが、従来から指摘されている（合田ら, 1975）。一方、このような外力等の推定誤差を考慮して、構造物を設計する手法の一つとして信頼性設計手法が提案され、各種構造物の構造設計などに取り入れられている。しかしながら、海岸・港湾護岸の機能設計において、信頼性設計法を取り入れられた例はほとんどない。

そこで、本研究では、越波流量の推定誤差を考慮した合理的な海岸・港湾護岸の機能設計法の確立を図ること（信頼性設計法を導入すること）を目的として、越波流量の推定誤差分布について検討するとともに、その結果を用いてモンテカルロ法によって耐用期間中の期待被害額（越波による背後地の浸水被害額）を算定し、それに初期建設費を加えた期待総費用が最小となるように設計する手法を検討した。また、この手法を用いて、背後地の資産額や沖波の出現特性によって、最適な護岸断面がどのように変化するのか検討した。

2. 越波流量の推定誤差に関する検討

越波流量の推定誤差の検討は、合田ら（1975）の実験結果に著者らが新たに行った水理実験の結果を追加したものと、現在設計に用いられている合田ら（1975）の越

表-1 実験条件

護岸形式	直立護岸
海底勾配	1/30
目標スペクトル	Bretschneider・光易型
周期 $T_{1/3}$ (s)	1.0, 1.5
換算沖波波高 H_0 (cm)	2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0
のり先水深 h (cm)	0, 6.0, 10.0, 16.0, 20.0
護岸天端高 h_c (cm)	4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0

波流量推定図から推定した結果を比較することによって、その誤差分布を検討した。

（1）水理実験の概要

著者らの行った実験は、二次元造波水槽内に勾配が1/30の傾斜海浜と直立護岸模型を設置して行った。越波量の測定は、直立護岸模型の背後に越波升を設置し、実験終了後に越波升内に貯まった水量を計測することによって行った。また、この実験では、Bretschneider・光易型スペクトルを有する不規則波を420s間作用させ、越波升に貯まった水量を造波時間で除し、単位幅当たりに換算して平均越波流量 q を算定した。なお、実験条件の詳細については、表-1に示すとおりである。

（2）越波流量の実験値と推定値の比較

図-1は、合田らおよび本実験で得られた全362個の越波流量の実験値と、越波流量推定図により算定した越波流量の推定値を比較したものである。これによると、両者の実験結果は、いずれも勾配が1:1の直線を中心にかなりばらついていることがわかる。また、このばらつきは越波流量が小さくなるほど、大きくなる傾向が見られる。したがって、後述する越波流量の推定誤差分布については、無次元越波流量のオーダー別にその誤差分布を検討するものとした。

（3）越波流量の推定誤差分布

図-2は、無次元越波流量のオーダー別に越波流量の推定誤差分布を示したものである。ここで、 q_m^* は実験値の無次元越波流量、 q_e^* は推定値の無次元越波流量を表し、図の縦軸は q_m^*/q_e^* の出現確率密度 $p(q_m^*/q_e^*)$ である。また、図中の曲線は、式（1）で表される正規分布を示している。

* 正 会 員 工 修 (株)ニュージエック河川海岸部海岸室
** フェロー 工 博 京都大学防災研究所教授
*** 正 会 員 工 博 関西大学教授 工学部土木工学科
**** 学生会員 関西大学大学院工学研究科

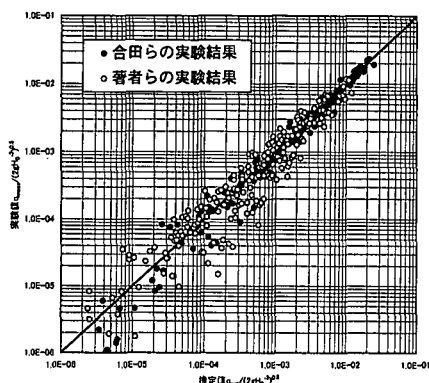


図-1 越波流量の実験値と計算値の比較

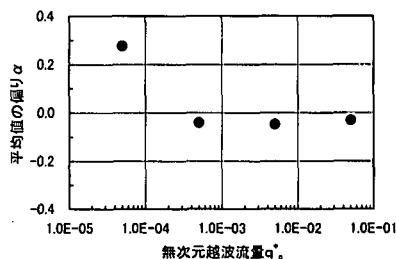


図-3 無次元越波流量と平均値の偏りの関係

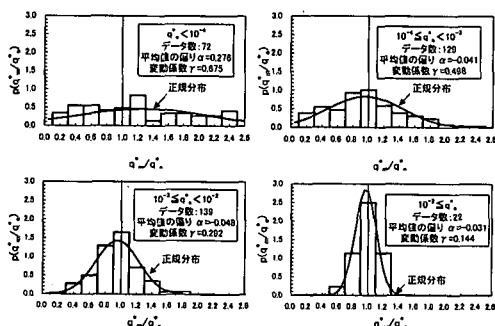


図-2 無次元越波流量のオーダー別の越波流量の推定誤差分布

$$p(X_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(X_m - \bar{X}_m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 X_m は q_m^* と q_e^* との比、 σ は標準偏差、 $\bar{X}_m$ は X_m の全データについての平均値であり、平均値の偏り α を用いて表すと、式 (2) のようになる。また、データのばらつきの度合を表す変動係数 γ は式 (3) で表される。

$$\bar{X}_m = 1 + \alpha \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\gamma = \sigma / \bar{X}_m \quad \dots\dots\dots (3)$$

これによると、 q_e^* が 10^{-4} 未満の推定誤差分布は、若干正規分布に一致せず、一様分布に近い分布形を示すが、 q_e^* が 10^{-4} 以上の推定誤差分布は、正規分布に比較的良く一致していることがわかる。また、この結果から、変動係数 γ を用いて、無次元越波流量のオーダー別にばらつき度を定量的に評価することが可能になるものと考えられる。

図-3 および図-4 は、図-2 を基にして無次元越波流量 q_e^* と平均値の偏り α および変動係数 γ の関係を調べた結果である。平均値の偏りについては、 q_e^* が 10^{-4} 以下では 0.276 であり、若干大きな値になるが、 q_e^* が 10^{-4} 以上では -0.04 程度でほぼ一様になる。変動係数については、 q_e^* が大きくなればほぼ直線的に小さくなることがわ

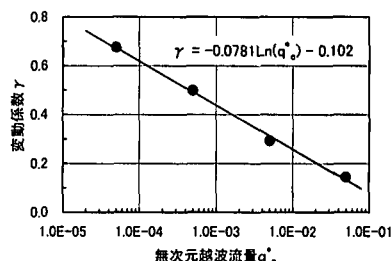


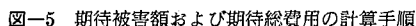
図-4 無次元越波流量と変動係数の関係

かる。そこで、両者の関係を最小二乗法により、回帰式を求めると図-4 中に示すようになる。また、この変動係数を波浪変形計算の変動係数 (高山・池田 (1991) の検討結果では 0.04) あるいは波力算定の変動係数 γ (高山・池田 (1991) の検討結果では 0.17) と比較すると、かなり大きくなる。すなわち、越波流量の推定誤差のばらつきは、他の外力に比べて、非常に大きいといえる。

3. 期待被害額および期待総費用の計算法

越波流量の推定誤差を考慮して耐用期間中の期待総被害額および期待総費用を算定する手法としては、図-5 に示すような手法を考えた。具体的な計算方法および計算手順は、以下に示すとおりである。

- ① 沖波は、対象地点の沖波出現分布特性を検討し、その結果に基づいて、乱数を用いて 1 年に 1 回の割合で発生させる。
- ② 潮位の設定は、天文潮および高潮による潮位偏差を考慮するものとする。ここでは、天文潮については、対象地点の各分潮の振幅および遅角を考慮した主要 4 分潮を乱数で与える。潮位偏差については、50 年確率波で対象地点の計画潮位偏差になるものとし、発生させた沖波波高 H_0 に比例させて求めるものとする。
- ③ 発生させた沖波および潮位に基づき、波浪変形計算を実施して、対象護岸位置の換算沖波波高 H'_0 を算定する。この場合、平均値の偏り α と変動係数 γ を適切に与えて、正規分布のばらつきを考慮するものとする。
- ④ 越波流量の算定は、設定した潮位、換算沖波波高および護岸の天端高等を基に、高山ら (1982) の近似計算



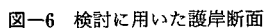
⑦総被害額の計算は、波浪変形や越波流量等の確率分布(ばらつき)を考慮するため、何回もの繰り返し計算を行う必要がある。そこで、ここまでの過程を1回の試行として、さらに乱数を変えて何回も試行を繰り返し、

	浸水深	被害率	備 考
床下浸水	10 cm 未満	0.000	被害なし
	10 cm 以上 45 cm 未満	0.031	
	45 cm 以上 50 cm 未満	0.100	
床上浸水	50 cm 以上 100 cm 未満	0.164	
	100 cm 以上 200 cm 未満	0.248	
	200 cm 以上 300 cm 未満	0.677	
	300 cm 以上	0.753	

なお、期待被害額および期待総費用の計算においては、計算機によって乱数を発生させて現象を繰り返し試行するモンテカルロ法を用いた。

(1) 計算条件

沖波の出現分布は、太平洋側モデル（和歌山地点を想定）として形状母数 $k=2.0$ 、係数 $A=4.15$ 、 $B=1.00$ のワイブル分布を用いた場合と、日本海側モデル（舞鶴地点を想定）として $A=0.59$ 、 $B=5.82$ のグンベル分布を用いた場合の2ケースについて検討を行い、沖波の出現分布特性による影響を比較検討するものとする。なお、周期 $T_{1/3}$ は、波形勾配 H_0/L_0 が 0.030 となるように、発生させた沖波に応じて設定するものとする。図-7 は、これらの沖波の出現分布を、再現期間 R_p との関係で表し



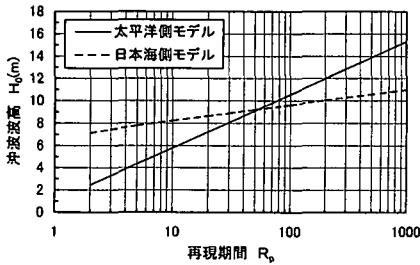


図-7 再現期間と沖波波高の関係

たものであり、現行設計法に基づく設計波浪を50年確率波とすると、両モデルとも一致し $H_0 = 9.20 \text{ m}$ ($T_{1/3} = 14.0 \text{ s}$) となる。

また、前述したように、波浪変形計算により換算沖波波高を算定する必要があるが、ここでは計算を簡単に行うため、屈折係数 $K_r = 0.80$ 、回折係数 $K_d = 1.00$ として一律に与えるものとする。ただし、正規分布のばらつきを考慮するものとし、平均値の偏り α および変動係数 γ は、現地観測結果を基にして検討した竹中ら (1999) の検討結果を基に、 $\alpha = 0.00$ 、 $\gamma = 0.20$ に設定した。なお、波は護岸に対して直入射する (波向の影響は考えない) ものとし、高波の継続時間は1時間とした。

このモデル護岸に対して、現行設計法の許容越波流量を一般的に良く用いられている $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ とすると、護岸天端高は $h_c = 15 \text{ m}$ となる (設計波は50年確率波、計画高潮位はH.H.W.L.である)。この護岸天端高について、現行基準に基づいて護岸の構造設計を行い、建設費を「港湾土木請負工事積算基準」(「財」港湾空港建設サービスセンター, 2002) 等を基に積算すると、単位幅当たり約1,500万円/mとなる。期待被害額および期待総費用の検討は、この護岸の建設費を基準とし、護岸天端高が1m高くなるにしたがって建設費が100万円/m増加するものとした。

検討に用いる護岸背後地の資産額は、「治水経済調査マニュアル」(国土交通省河川局, 2003)等を参考に、20万円/ m^2 (非常に高度に土地が利用されている場合の資産額)、10万円/ m^2 (大都市臨海部の平均的な資産額)、5万円/ m^2 (地方都市臨海部の平均的な資産額)の3ケースに変化させた。

(2) 計算結果

計算に先立ち、モンテカルロ法による計算の繰り返し回数 (図-5参照) を、乱数の初期値の違いによる結果のばらつきが小さくなるように設定する必要がある。図-8は、繰り返し回数と期待被害額の関係調べた一例である。これは、各繰り返し回数ごとに乱数の初期値を変えた10通りの計算を行い、その10通りの結果の平均値、最大値、最小値および標準偏差を示したものである。図か

ら明らかなように、繰り返し回数が多くなると初期値の違いによるばらつきは小さくなることわかる。今回の検討においては、この図から、計算結果が十分安定となるように繰り返し回数は5,000回と設定した。

図-9は、護岸天端高を変化させた場合に、初期建設費、期待被害額、期待総費用がどのように変化するかを調べた一例であり、太平洋側モデルで背後地の資産額を10万円/ m^2 とした場合の結果を示した。この例では、護岸天端高 h_c が16mで期待総費用が最小となり、それより護岸天端高を低くすると、期待被害額が急激に増大する。逆に、それより護岸天端高を高くすると、期待被害額が小さくなり、期待総費用は初期建設費とほぼ同一となる。

図-10は、期待総費用に与える背後地の資産額の影響を調べた結果であり、太平洋側モデルの結果を示した。この図の横軸は、現行設計法 (許容越波流量を $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) で設計した場合の護岸天端高 h_{c0} (ここでは15m) と各護岸天端高 h_c の比であり、縦軸はその護岸断面の初期建設費 (ここでは1,500万円/m) と各護岸天端高で算定した期待総費用との比である。これによると、護岸天端高が低い場合には、期待総費用は背後地の資産額の影響が非常に顕著に表れる。また、この例では、期待総費用が最小となる最適護岸天端高は、背後地の資産額を10万円/ m^2 とした場合に、現行設計法で設計した天端高とほぼ同一 ($h_c/h_{c0} = 1.0$ で最小) となり、それより背後地

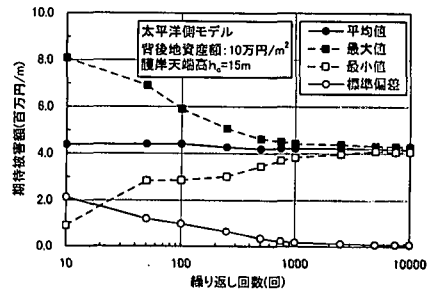


図-8 計算の繰り返し回数と期待被害額のばらつき

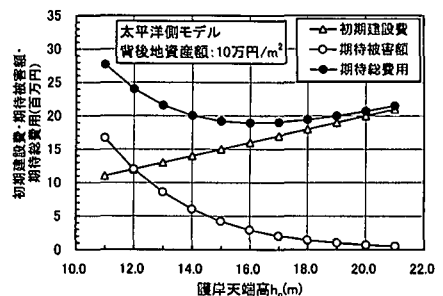
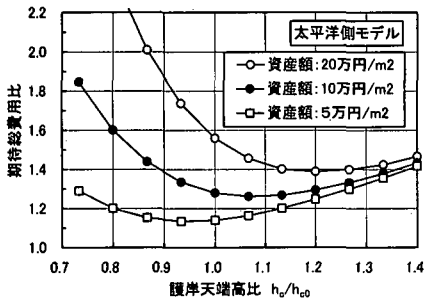
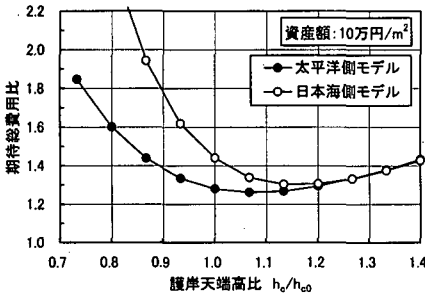


図-9 期待被害額および期待総費用の計算例



図一10 背後地資産額を変化させた場合の期待総費用



図一11 沖波の出現特性を変化させた場合の期待総費用

の資産額が小さくなると、最適護岸天端は現行設計法で設計した護岸天端より低くなり、逆にそれより資産額が大きくなると現行設計法で設計した護岸天端より高くなる。

図一11は、期待総費用に与える沖波の出現分布特性の影響を調べたものであり、背後地の資産額を10万円/m²の結果を示した。これによると、護岸天端高が低い場合には、沖波の出現分布特性の影響が顕著に表れ、毎年設計波に近い波が来襲する日本海側モデルのほうが太平洋側モデルに比べ期待総費用はかなり高くなる。ただし、護岸天端高が高くなると両者の期待総費用に差がなくなる。また、期待総費用が最小となる最適護岸天端高は、日本海側モデルのほうが太平洋側モデルに比べて高くなることがわかる。

5. おわりに

以上、本研究では、越波流量の推定誤差分布について検討するとともに、その結果を用いてモンテカルロ法によって耐用期間中の期待被害額を算定し、それに初期建

設費を加えた期待総費用が最小となるように設計する手法を検討し、モデル護岸に対して試算を行った。その結果、この手法を用いることによって、背後地の資産額や対象海域の沖波の出現特性に応じて、海岸・港湾護岸の機能設計を合理的に行うことが可能になることがわかった。

しかし、この手法を実際の設計に適用していくためには、他の構造型式（消波ブロック被覆型等）の越波流量の推定誤差分布、高波と高潮の相関を考慮した結合出現確率、高波の継続時間の取り扱い方、波向の影響、高波による構造物の破壊確率と破壊した場合の越波流量の増加の影響、護岸の背後地の平面的な地形と資産分布を考慮した期待被害額の算定法、などを検討して行く必要がある。今後検討していきたいと考えている。

また、ここで示した手法は、人的被害については考慮されていない。したがって、護岸の直背後まで土地が利用され人家などが存在する場合には、単に期待総費用が最小となる最適断面の検討だけでなく、別途人命の確保という観点からの検討が重要になってくることを付記しておく。

最後に、本研究を進めるあたり、当時関西大学工学部学生の助田 暁氏、横田純弥氏に実験計測等の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技研報告, 第14巻, 第3号, pp. 3-44.
- (財) 港湾空港建設技術サービスセンター (2002): 港湾土木請負工事積算基準, 平成14年度改訂版.
- 国土交通省河川局 (2002): 治水経済調査マニュアル (案), pp. 1-3.
- 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰 (2002): 沿岸防災施設の性能設計の基本的な考え方, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 931-935.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.
- 高山知司・池田直太 (1991): 現行設計法における防波堤の滑动安定性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 641-645.
- 竹中秀夫・西田 稔・柳原 弘・殿最浩司・佐藤広章 (1999): 現地観測結果を用いた波浪変形計算および波力の推定精度に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 826-830.
- 農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局 (1998): 海岸事業の費用対効果分析手法 (平成9年度版), pp. 19-21.