

滑動量を考慮したケーソン式防波堤の目標安全性水準の提案

森屋陽一*・山本修司**・吉永宙司***

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 理事

*** 前 新潟港湾空港技術調査事務所長

滑動量を考慮してケーソン式防波堤の設計を行う場合の目標安全性水準は、これまでも提案されているものの、実被災確率との関係は明確とはなっておらず、十分な検討が行われているとは言えない。本研究では、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤を対象に、旧基準の規定(滑動安全率 1.2) が有する設計供用期間中の基準滑動量に対する超過確率を算定し、実際の被災確率と比較した上で、旧基準の規定が有する安全性水準を滑動量に基づく設計を行う場合の目標安全性水準として提案した。

キーワード：目標安全性指標、信頼性設計、ケーソン式防波堤、滑動量

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準が仕様規定型設計体系から性能規定型設計体系へ移行したことにより、港湾の施設は目標とする安全性水準を満足するように設計を行うことになるとともに、より合理的な設計手法の採用が容易になった。施設の設計を行う場合、目標安全性水準の設定は非常に重要であり、ケーソン式防波堤の滑動破壊に着目すると、防波堤の重要度を考慮した基準滑動量に対する許容超過確率が提案¹⁾されているとともに、旧基準の規定(滑動安全率 1.2) による設計結果が有している基準滑動量に対する超過確率を算定した研究²⁾もある。

しかし、これらの研究による基準滑動量に対する超過確率と実被災確率との関係は明確とはなっておらず滑動量を考慮した設計を行う場合の目標安全性水準について、十分な検討が行われているとは言えない。

本研究では、全国の既往の設計資料から設計条件の偏りがないように収集したケーソン式防波堤の事例を対象に、旧基準の規定(滑動安全率 1.2) により設計した堤体の設計供用期間中の基準滑動量に対する超過確率を算定するとともに、算定結果の超過確率と実際の被災確率とを比較し、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動量に基づく設計を行う場合の目標安全性水準を設定した。

2. ケーソン式防波堤の滑動量の算定手法

2.1 滑動量の算定方法の概要

滑動量の算定には、下迫・高橋³⁾の提案するモンテカルロ法を用い、設計供用期間は 50 年とし、継続時間 2 時間の高波に年 1 回遭遇するとした。波圧の時系列モデルとして、ケーソン式混成堤には三角パルス波形に正弦波形を組み合わせたモデル⁴⁾を用い、消波ブロック被覆堤に

は三角パルス波形モデル¹⁾を用いた。

また、モンテカルロ法の精度向上のために、一様乱数の生成にはメルセンヌ・ツイスタ法を用い、正規乱数の生成にはボックス・ミュラー法を用いた。モンテカルロ法の繰り返し回数は、超過確率が 1% 程度の試算の結果に基づき、現実的な計算時間とする観点から 10,000 回とした。

2.2 設計変数の確率特性

各設計因子の従う確率特性(平均値の偏り μ / X_k と変動係数 V)⁵⁾を表-1 に示す。ここで、 r_w は既往最高潮位(H. H. W. L.) とさく望平均満潮位(H. W. L.) の比を表す。元の設計条件で設計潮位として H. H. W. L. が用いられている

表-1 各設計因子の従う確率特性

	μ / X_k	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		
$r_w=1.5$	1.00	0.20
$r_w=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数	1.06	0.15
単位体積重量		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04

ケースについては、滑動量の算定においても設計潮位を用い、潮位は確定値として扱った。また、摩擦増大マットを用いているケースについては、摩擦係数の特性値を0.75とし、確率特性は表-1に示す値を用いた。

3. 滑動量に基づく目標安全性水準

3.1 検討条件

全国的设计資料から設計条件の偏りがないうように収集したケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の設計条件⁶⁾の中から、ケーソン式混成堤 33 ケースと消波ブロック被覆堤 32 ケースを検討対象として抽出した。ケーソン式混成堤の検討条件は設計波高 H_{max} が 4.84m~16.32m, 水深 6.6m~23.2m であり、消波ブロック被覆堤の検討条件は設計波高 H_{max} が 5.15m~17.86m, 水深 5.3m~21.1m である。また、設計条件が H. H. W. L. であったケースはケーソン式混成堤は 9 ケース、消波ブロック被覆堤は 7 ケースであり、摩擦増大マットを用いたケースはケーソン式混成堤は 10 ケース、消波ブロック被覆堤は 6 ケースである。

3.2 基準滑動量に対する超過確率

最新の沖波波浪条件を用いて、旧基準の規定（滑動安全率 1.2）に基づく設計を実施し堤体幅を算定し、次いで、算定した堤体幅に対して、基準滑動量 10cm, 30cm, 100cm に対する超過確率 (P_{10} , P_{30} , P_{100}) を算定した。算定結果の P_{10} , P_{30} , P_{100} および期待滑動量 ESD の平均値と標準偏差を表-2 に示す。なお、各超過確率の平均値および標準偏差は信頼性指標に変換して算定したものである。

消波ブロック被覆堤の基準滑動量に対する超過確率は、ケーソン式混成堤に比べて 1 オーダー小さい。これは、表-2 に示す波力算定式推定精度の平均値の偏りと変動係数の違いによる。波圧算定式推定精度の平均値の偏りを 1.0、変動係数を 0.1 として P_{10} , P_{30} , P_{100} の平均値を算定すると、ケーソン式混成堤ではそれぞれ 1%, 0.6%, 0.3% となり、消波ブロック被覆堤ではそれぞれ 2%, 0.6%, 0.1% となり、ほぼ同じ値となる。

表-2 超過確率と期待滑動量の平均値と標準偏差

(a) ケーソン式混成堤

	range	平均	標準偏差
P_{10} (%)	0.1~8	2	2
P_{30} (%)	0.01~5	1	1
P_{100} (%)	0.01~3	0.5	0.7
ESD(cm)	0.1~10	3	4

(b) 消波ブロック被覆堤

	range	平均	標準偏差
P_{10} (%)	0.05~0.7	0.2	0.2
P_{30} (%)	0.01~0.2	0.05	0.04
P_{100} (%)	0~0.05	0.01	0.01
ESD(cm)	0.03~0.4	0.1	0.08

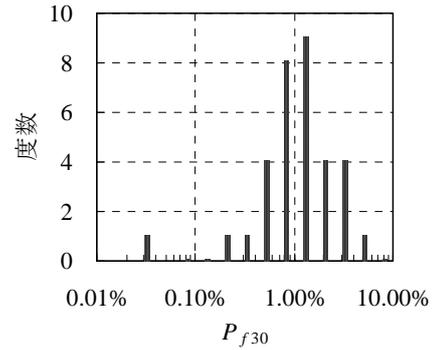


図-1 P_{f30} の分布 (ケーソン式混成堤)

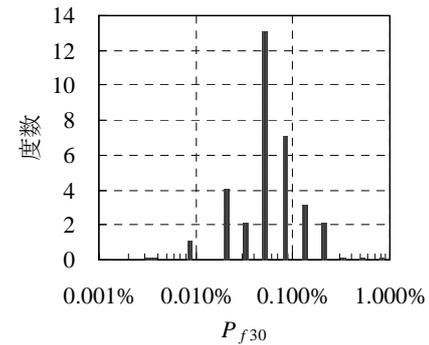


図-2 P_{f30} の分布 (消波ブロック被覆堤)

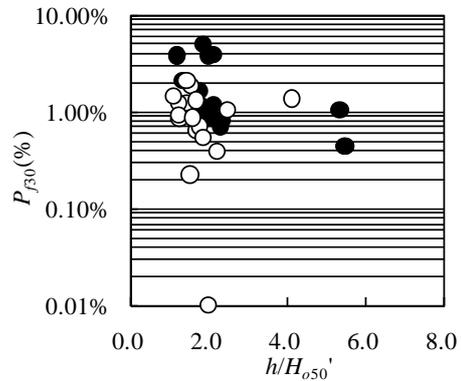


図-3 P_{f30} と水深波高比の関係 (ケーソン式混成堤)
(● : $\gamma_{50} < 1.2$, ○ : $\gamma_{50} \geq 1.2$)

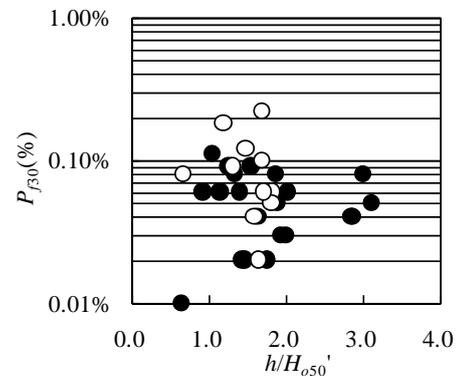


図-4 P_{f30} と水深波高比の関係 (消波ブロック被覆堤)
(● : $\gamma_{50} < 1.2$, ○ : $\gamma_{50} \geq 1.2$)

なお、吉岡ら²⁾が算定したケーソン式混成堤の P_{30} は 2.6% であり、本研究の算定結果に比べて 2 倍程度大きい。本研究では、吉岡らと同じ構造物条件を用いているが、設計波浪条件は最新ものを用いており、吉岡らが用いた条件よりも、平均して設計波高が 17% 程度大きい。このため、滑動安全率 1.2 で規定された堤体幅は大きくなり、相対的に重複波圧よりも砕波圧が作用する割合が増したことが、 P_{30} が小さくなった原因であると考えられる。

図-1 および図-2 はケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の P_{30} の度数分布を示したものである。ケーソン式混成堤も消波ブロック被覆堤も、滑動安全率 1.2 で規定された断面が保有する P_{30} は広く分布している。吉岡ら²⁾がケーソン式混成堤の検討で示したように、消波ブロック被覆堤についても安全率に基づいた設計では滑動量を十分に制御できないといえる。

図-3 および図-4 は基準滑動量に対する超過確率と設計変数との関係の例として、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の P_{30} と波高水深比の関係を示したものである。ここで、 γ_{50} は裾長さ (50 年確率波高と 10 年確率波高の比) であり、毎冬高波浪が頻繁に来襲する北部日本海側は 1.2 以下と小さく、北部日本海側以外では 1.2 以上と大きくなる傾向がある⁷⁾。この結果より、裾長さを考慮しても水深波高比と超過確率との相関は低いといえる。他の設計変数と超過確率との相関も低いことを確認しており、単一のパラメタでケーソン式防波堤の期待滑動量に対する超過確率を制御することは難しいと考えられる。

3.3 実際の被災確率

河合ら⁸⁾を参照し、合田の波圧算定式を用いて設計されたケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の 1989 年～1993 年の既設函数と被災函数を表-3 に示す。1990 年のケーソン式混成堤の被災に含まれる紋別港の事例が、合田の波圧算定式を用いて設計されているものかどうかは不明である。

表-3 ケーソン式防波堤の既設函数と被災函数

年度	ケーソン式混成堤		消波ブロック被覆堤	
	既設函数	被災函数	既設函数	被災函数
1989	2320	0	1266	0
1990	2487	12(or11)	1367	2
1991	2663	0	1460	0
1992	2777	1	1544	0
1993	2894	6	1674	0
計	13141	19(or18)	7311	2

このデータに基づき、堤幹部の被災は堤頭部の被災の約 1/3 である⁸⁾ことを考慮し、年被災確率を求めると、設計供用期間 50 年間のケーソン式混成堤の被災確率 P_{fc} と消波ブロック被覆堤の被災確率 P_{fb} は、(1) 式および(2) 式に示す程度となるであろう。

$$P_{fc} = 1 - \left(1 - \frac{19/3}{13141}\right)^{50} = 2.4 \times 10^{-2} \approx 2 \sim 3\% \quad (1)$$

$$P_{fb} = 1 - \left(1 - \frac{2/3}{7311}\right)^{50} = 4.5 \times 10^{-3} \approx 0.1 \sim 1\% \quad (2)$$

3.4 重要度を考慮した許容超過確率の設定例

下迫ら¹⁾が提案している重要度を考慮したケーソン式防波堤の許容超過確率の設定例を表-4 に示す。許容超過確率の数値は、下迫らのこれまでの検討における従来の滑動安全率や期待滑動量との相関関係に基づいて提案された参考値である。

表-4 重要度を考慮した許容超過確率の設定例

		構造物の重要度		
		高い	普通	低い
ESD (cm)	10	15%	30%	50%
	30	5%	10%	20%
	100	2.5%	5%	10%

ケーソン壁厚以上の滑動が生じるとケーソン側壁に波浪が作用し、側壁の破壊する危険性が高くなることなどから、これまで被災基準としてよく用いられる滑動量 30cm 以外にも、目視で確認できる滑動量 10cm と重大な被災につながる目安の 100cm についての許容超過確率を設定することで、滑動破壊をより精緻に制御する考え方がある。

防波堤は滑動量が 30cm を越えると被災したと認定される場合が多いことから、重要度が普通で期待滑動量 30cm の場合について、下迫らの提案値と実際の被災確率を比べると、ケーソン式混成堤の場合 1 オーダー、消波ブロック被覆堤の場合 1～2 オーダー大きい。

下迫らの提案している手法は、滑動量を指標として直接堤体断面を求める手法であり、多少の滑動を許容することによって、より経済的な断面を与えるものであるため、実際の被災確率と比べて、許容超過確率の提案値が大きくなるのは当然の結果である。ただし、消波ブロック被覆堤の場合の提案値と実際の被災確率との開きは大きく、波圧算定式推定精度の確率特性の影響も含まれていると考えられる。

3.5 目標安全性水準の提案

目標安全性水準の設定のために、基準となる滑動量を定める。前述したように、下迫ら¹⁾は基準滑動量を 10cm, 30cm, 100cm と 3 つ設定することを提案している。本研究でも、下迫らに倣い、基準滑動量を 10cm, 30cm, 100cm の 3 つとする。また、図-5 および図-6 にケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の P_{30} に対する P_{10} と P_{100} を示す。

今回検討した条件では、ケーソン式混成堤は P_{30} と P_{10} および P_{100} との相関は高く、従来の検討でも用いられてきた基準滑動量 30cm に対する超過確率を制御することで、 P_{10} および P_{100} も十分に制御できると考えられる。しかし、

消波ブロック被覆堤は P_{f30} と P_{f10} および P_{f100} との相関は低い。この相関の低さは、モンテカルロシミュレーションの繰り返し回数が不十分なことも原因の一つと考えられる。

目標安全性水準の設定方法としては、様々な方法がある⁹⁾が、本研究では、ケーソン式防波堤の設計実務への適用の観点から、実際の被災確率との比較を行った上で、過去の設計基準類の平均的な安全性水準に基づく方法によるものとした。

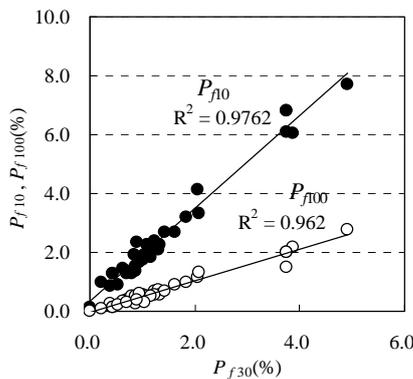


図-5 ケーソン式混成堤の P_{f30} と P_{f10} , P_{f100} の関係

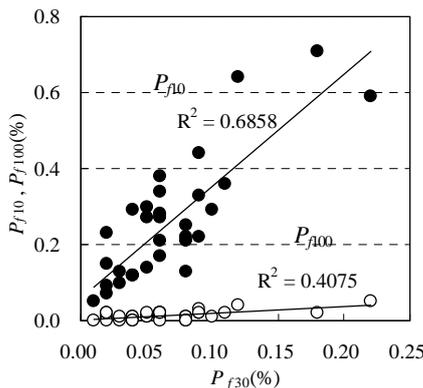


図-6 消波ブロック被覆堤の P_{f30} と P_{f10} , P_{f100} の関係

表-2 に示した旧基準の規定（滑動安全率 1.2）に基づく基準滑動量 10cm, 30cm, 100cm に対する超過確率 (P_{f10} , P_{f30} , P_{f100}) と (1) 式および (2) 式に示す実際の被災確率を比較すると、ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤ともに、実際の被災確率は P_{f30} の平均値よりやや大きく、 P_{f10} の平均値と同程度であることがわかる。防波堤は滑動量が 30cm を越えると被災と認定されることが多いため、実際の被災確率は、基準滑動量 30cm の場合に相当すると考えられる。以上より、やや安全側の設定になるが、表-2 に示した旧基準の規定に基づく超過確率の平均値を目標安全性水準の設定値として提案する。

ここで、消波ブロック被覆堤の超過確率については、モンテカルロシミュレーションの繰り返し回数の不足により、十分な精度が得られていない可能性も否定できないが、ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤ともに、超過確率が実際の被災確率と調和的な関係にあることか

ら、表-2 に示す値は目標安全性水準としておおむね妥当であると考えられる。

また、下迫らが提案するように、多少の滑動を許容することによってより経済的な断面を与えることが可能であるため、構造物の重要度、設計変数の確率特性、ライフサイクルコスト等を十分検討した上で、適切な目標安全性水準を設定することを否定するものではない。

4. おわりに

全国的设计資料から設計条件の偏りがないように収集したケーソン式防波堤の事例を対象に、旧基準の規定（滑動安全率 1.2）による設計結果が有する基準滑動量に対する超過確率を算定した。次いで、実際の被災確率も参照し、旧基準の規定（滑動安全率 1.2）が有するケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の滑動量に基づく目標安全性水準を設定した。その結果、以下の結論が得られた。

- ① ケーソン式混成堤も消波ブロック被覆堤も、滑動安全率 1.2 で規定された断面が保有する基準滑動量に対する超過確率はばらつきが大きく、安全率に基づいた設計では滑動量を十分に制御できない。
- ② 実際の被災確率と比較し、やや安全側ではあるが、表-2 に示した旧基準の規定（滑動安全率 1.2）に基づく基準滑動量 10cm, 30cm, 100cm に対する超過確率の平均値を目標安全性水準として提案する。

なお、本論文は参考文献の 10) の一部に加筆修正したものである。

参考文献

- 1) 下迫健一郎, 大寄菜々子, 中野史丈: 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第 45 巻, 第 3 号, pp. 3-23, 2006.
- 2) 吉岡健, 長尾毅, 森屋陽一: ケーソン式混成堤における部分係数の滑動量を考慮した設定方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 811-815, 2005.
- 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, pp. 3-30, 1998.
- 4) 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.
- 5) 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法の適用, 土木学会論文集, No. 689, I-57, pp. 178-182, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 河合弘泰, 高山知司, 鈴木康正, 平石哲也: 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, 第 36 巻, 第 4 号, pp. 3-42, 1997.
- 9) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 10) 吉永宙司, 大下善幸, 森屋陽一, 国栖広志, 宮脇周作, 長尾毅: 滑動量を考慮したケーソン式防波堤の目標安全性水準について, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp. 483-488, 2008.