

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

TARGET FAILURE PROBABILITY FOR CAISSON TYPE BREAKWATER IN VIEW OF SLIDING DISPLACEMENT

吉永宙司¹・大下善幸²・森屋陽一³・国栖広志⁴・宮脇周作⁵・長尾毅⁶
Hiroshi YOSHINAGA, Yoshiyuki OOSHITA, Yoichi MORIYA, Hiroshi KUNISU,
Shusaku MIYAWAKI and Takashi NAGAO

¹正会員 前 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778)

²新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778)

³正会員 博(工) (財)沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16住友半蔵門ビル6F)

⁴フェロー会員 工博 (株)日本港湾コンサルタント (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6)

⁵(株)日本港湾コンサルタント (〒141-0031 東京都品川区西五反田8-3-6)

⁶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)

The reliability-based design method is the standard design method for the technical codes for port facilities. Determination of target failure probability is very important on the reliability-based design.

In this study, the sliding failure of the caisson type breakwater (composite type breakwater and breakwater covered with wave-dissipating blocks) is treated in view of sliding displacement. First, survey of the latest design wave condition including extreme probability condition is conducted. Characteristic of design wave condition in each area is analyzed. Next, failure probability for caisson type breakwaters designed by conventional design method is estimated in view of sliding displacement. Finally, target failure probability is optimized in order to apply the reliability-based design to practical design using the latest design wave condition.

Key Words : Target failure probability, reliability-based design, sliding displacement, caisson type breakwater

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いない。また、旧基準の規定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では、使われている波浪データが最新のものではなく、

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。

一方、ケーソン式防波堤の供用期間中の滑動量の推定には、防波堤の水深が浅くない限り、波浪の極値分布形が影響し、特に、極値分布形の裾の広がりをおろすパラメータである裾長さ(50年確率波高と10年確率波高の比)が大きく影響する³⁾。

本研究では、はじめにアンケート調査により全国の港湾の最新の沖波波浪条件を把握するとともに、沖波波浪条件の地域特性について、極値分布形と裾長さに着目して分析した。次いで、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した。最後に、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. 全国沖波波浪条件

(1) 沖波波浪条件のアンケート調査

全国の港湾の最新の沖波波浪条件について、北海道開発局、沖縄総合事務局、各地方整備局の港湾空港技術調査事務所等にアンケート調査を実施するとともに、調査結果の整理、分析を行った。

収集したのは北海道から沖縄まで全国の123港湾の波向別の極値分布関数とそのパラメタ、10年確率波高および周期、50年確率波高および周期である。ただし、極値分布形やそのパラメタが不明な地点があり、また、東北地方の日本海側および太平洋側については、波向別の極値分布関数とそのパラメタのみの収集となったため、その裾長さについては、極

値分布形が年最大値資料に基づいていると仮定し算出した。

一方、合田らは一連の研究^{3)~6)}で、波浪の極値分布関数は、海域毎に特定の母分布関数に従うとの考えに基づき、NOWPHASの観測データを用いて、日本沿岸の海域毎の母分布関数を示している。

合田ら^{4)~6)}が対象とした港湾のうち、アンケート調査結果が得られた港湾について、沖波波高が最大となる波向の極値分布形と裾長度を表-1～表-3に示す。留萌、瀬棚、苫小牧は元データの期間がやや古い。また、瀬棚は実測値、中城湾は実測値と推算値を元データとしているが、それ以外の港湾はすべて推算値を元データとしている。

表-1 日本海側の極値分布形と裾長さ γ_{50} の例 (γ_{50} が斜体のものは分布形からの推定値)

地点	データ期間	本研究			合田の研究 ³⁾		
		γ_{50}	分布関数	k	γ_{50}	分布関数	k
留萌	1968-1977	1.369	ワイブル	1.25	1.131	ワイブル	1.4
瀬棚	1978-1990	1.200	ワイブル	不明			
深浦	1952-2003	1.174	ワイブル	2.0			
秋田	1952-2003	1.204	ワイブル	2.0			
酒田	1952-2003	1.161	ワイブル	1.4			
新潟東	1953-2000	1.161	ワイブル	1.4			
輪島	1953-2000	1.204	極値Ⅱ型	5.0			
金沢	1953-2000	1.144	極値Ⅰ型	-			
福井	1953-2000	1.192	極値Ⅱ型	10.0			
鳥取	1956-2000	1.269	ワイブル	2.0			
浜田	1956-2000	1.277	ワイブル	2.0			

表-2 太平洋東岸の極値分布形と裾長さ γ_{50} の例 (γ_{50} が斜体のものは分布形からの推定値)

地点	データ期間	本研究			合田の研究 ³⁾		
		γ_{50}	分布関数	k	γ_{50}	分布関数	k
苫小牧	1945-1971	1.221	不明	不明	1.211	ワイブル	1.0
むつ小川原	1952-2002	1.222	ワイブル	1.0			
八戸	1952-2002	1.221	ワイブル	1.4			
宮古	1952-2002	1.253	ワイブル	1.4			
釜石	1952-2002	1.267	ワイブル	1.4			
仙台塩釜	1952-2002	1.271	ワイブル	1.0			
相馬	1952-2002	1.194	ワイブル	1.4			
小名浜	1952-2002	1.268	極値Ⅱ型	10.0			
常陸那珂	1952-2005	1.220	極値Ⅱ型	5.0			
鹿島	1952-2005	1.133	ワイブル	1.4			

表-3 太平洋南岸の極値分布形と裾長さ γ_{50} の例

地点	データ期間	本研究			合田の研究 ³⁾		
		γ_{50}	分布関数	k	γ_{50}	分布関数	k
下田	1955-2003	1.245	ワイブル	1.4	1.243	極値Ⅰ型	-
御前崎	1955-2003	1.174	ワイブル	2.0			
御坊沖	1955-2000	1.198	ワイブル	2.0			
室津	1953-1999	1.245	ワイブル	1.4			
宮崎	1953-1999	1.252	ワイブル	2.0			
志布志	1953-1999	1.261	ワイブル	2.0			
中城湾	1951-2004	1.321	ワイブル	1.4			

表-4 海域毎の裾長さの平均値と標準偏差

海域	裾長さ γ_{50} (本研究)		裾長さ γ_{50} (合田の研究 ³⁾)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
日本海 (北海道)	1.180	0.034	1.131	0.0038
日本海 (東北・北陸)	1.184	0.023		
日本海 (中国・九州)	1.291	0.063		
オホーツク・太平洋 (北海道)	1.230	0.070	1.211	0.0133
太平洋 (東北・関東)	1.241	0.052		
太平洋 (中部・近畿・ 四国・九州)	1.237	0.034	1.243	0.0193
太平洋・東シナ海 (鹿児島・沖縄)	1.366	0.033		
瀬戸内海	1.314	0.072	-	-

調査結果の極値分布関数は、適合度検定の結果として最も適合度の高いものが選ばれた結果であり、合田の研究³⁾で示された海域毎の母分布関数と必ずしも整合するものとはなっていない。

(2) 沖波波浪条件の地域特性

表-4に海域毎の裾長さ γ_{50} の平均値と標準偏差を示す。解析には、表-1～表-3に示した港湾に主要な港湾を加えた各海域6～13港湾を用いた。裾長さの平均値に関しては、日本海 (北海道・東北・北陸) で1.2以下と小さく、日本海 (中国・九州) ・オホーツク・太平洋・東シナ海で1.2以上と大きくなる傾向が見られた。日本海 (中国・九州) で裾長さの平均値が大きいことを除けば、定性的には合田³⁾の示したものと対応する。また、瀬戸内海の裾長さの平均値も1.3以上となる結果であった。

3. ケーソン式防波堤の滑動量の算定手法

(1) 滑動量の算定方法の概要

滑動量の算定には、下迫・高橋⁷⁾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⁸⁾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%程度の試計算の結果に基づき、現実的な計算時間とする観点から10,000回とした。

(2) 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)⁹⁾を表-5に示す。ここで、 r_{wl} 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-5に示す値を用いた。

表-5 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		
$r_{wl}=1.5$	1.00	0.20
$r_{wl}=2.0, 2.5$	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

4. 滑動量に基づく目標安全性水準

(1) 検討条件

全国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混成堤と消波ブロック被覆堤の設計条件¹⁰⁾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5.85m～15.98m, 水深6.0m～21.1mである。また, 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。

(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_{f10} , P_{f30} , P_{f100})を算定した。算定結果の P_{f10} , P_{f30} , P_{f100} および期待滑動量ESDの平均値と標準偏差を表-6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。

表-6 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
$P_{f10}(\%)$	0.1～8	2	2
$P_{f30}(\%)$	0.01～5	1	1
$P_{f100}(\%)$	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
$P_{f10}(\%)$	0.05～0.7	0.2	0.2
$P_{f30}(\%)$	0.01～0.2	0.05	0.04
$P_{f100}(\%)$	0～0.05	0.01	0.01
ESD(cm)	0.03～0.4	0.1	0.08

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-5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_{f10} , P_{f30} , P_{f100} の平均値を算定すると, ケーソン式混成堤はそれぞれ1%, 0.6%, 0.3%となり, 消波ブロック被覆堤はそれぞれ2%, 0.6%, 0.1%となり, ほぼ同じ値となる。

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_{f30} 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_{f30} 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。

また, 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_{f30} と波高水深比の関係を示したものであり, 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

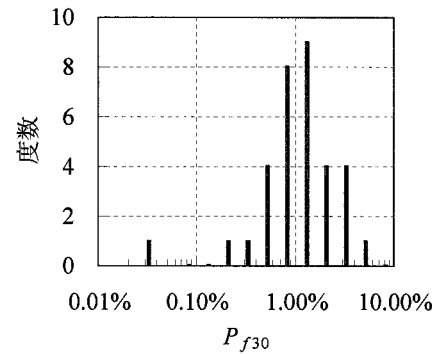


図-1 P_{f30} の分布 (ケーソン式混成堤)

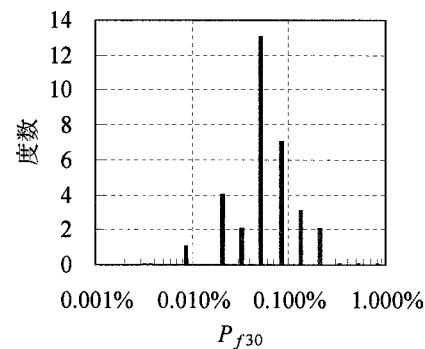


図-2 P_{f30} の分布 (消波ブロック被覆堤)

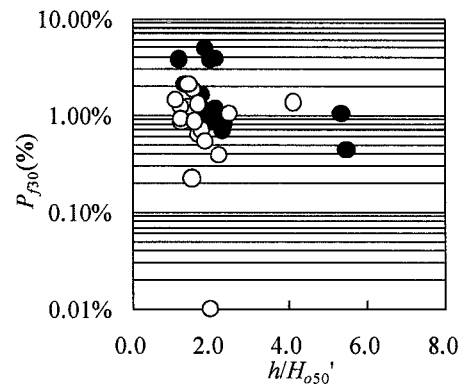


図-3 P_{f30} と水深波高比の関係 (ケーソン式混成堤)
(●: $\gamma_{50} < 1.2$, ○: $\gamma_{50} \geq 1.2$)

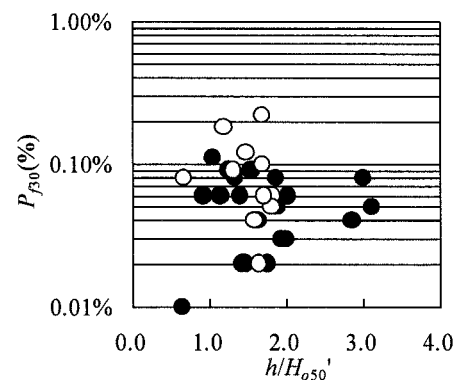


図-4 P_{f30} と水深波高比の関係 (消波ブロック被覆堤)
(●: $\gamma_{50} < 1.2$, ○: $\gamma_{50} \geq 1.2$)

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) 実際の被災確率

河合ら¹¹⁾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-7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-7 ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆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¹¹⁾ことを考慮し、年被災確率を求めると、設計供用期間50年間で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、データ数等による精度も考慮すると、(1)式および(2)式に示す程度となるであろう。

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

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

(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-8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-8 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である。

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。

(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決める。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_{f30} に対する P_{f10} と P_{f100} を示す。

今回検討した条件では、ケーソン式混成堤は P_{f30}

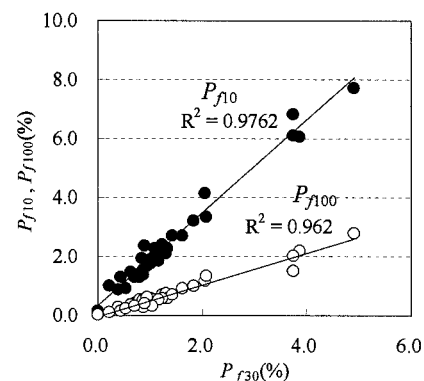


図-5 ケーソン式混成堤の P_{f30} と P_{f10} , P_{f100} の関係

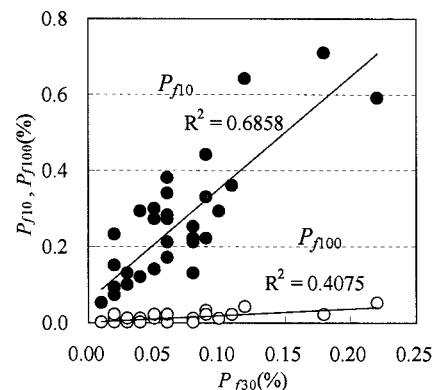


図-6 消波ブロック被覆堤の P_{f30} と P_{f10} , P_{f100} の関係

と P_{f10} および P_{f100} 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_{f10} および P_{f100} 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の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¹²⁾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。

表-6 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-6 に示した旧基準の規定に基づく超過確率の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の回数の不足により、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-6 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。

5. おわりに

アンケートにより全国の港湾の最新の沖波波浪条件を把握するとともに、沖波波浪条件の地域特性について極値分布形と裾長度に着目して分析した。次いで、全国の設計資料から設計条件の偏りがなく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。最後に、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 設計に用いられている沖波の極値分布関数は、海域ごとに同じとはいえない。裾長度の平均値に関

しては、日本海（北海道・東北・北陸）で 1.2 以下と小さく、日本海（中国・九州）とオホーツク・太平洋・東シナ海で 1.2 以上と大きい傾向が見られる。

② 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。

③ 実際の被災確率と比較し、やや安全側ではあるが、表-6 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値を目標安全性水準として提案する。

謝辞：本研究を行うにあたり、各地方整備局等には最新の沖波条件の調査にご協力頂きました。電源開発株式会社の吉岡健氏には滑動量算定プログラムの高度化に協力頂くとともに、(財)沿岸技術研究センターの山本修司理事をはじめ、高山知司京都大学名誉教授を委員長とした防波堤の新しい設計法に関する検討委員会の委員各位にも有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

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) 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。
- 4) 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. 211-215，1999。
- 5) 合田良実，竹下直樹，永井紀彦：太平洋南岸の極値波高統計の母分布関数について，海洋開発論文集，第 15 巻，pp. 327-331，1999。
- 6) 人見寿，片山裕行，合田良実，永井紀彦：日本海沿岸における極値波高統計の母分布関数について，第 55 回土木学会年次学術講演会講演集，II-58，2000。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986。