

# 混成防波堤の滑動信頼性に及ぼす波浪の波向変化特性の影響

池末俊一\*・高山知司\*\*・下迫健一郎\*\*\*

## 1. まえがき

現行の設計法では、求めた設計沖波に対して波浪変形計算を行い、防波堤設置地点における波の諸元を求め、その値を用いて防波堤に作用する波力を算定している。そして、防波堤の破壊モードについて、防波堤が所定の安全率を満たして安定なように堤体の高さ、重量、幅等が決定される。しかし、設計の各段階では多くの不確定要因が存在することが考えられ、過去に様々な検討が行われている。合田 (1988) は、用いる波浪データ数の有限性に起因する設計沖波波高の推定誤差についての検討を行っている。高山ら (1991) は、波浪変形計算や波圧公式、堤体の摩擦係数などの推定精度について実験値との比較によってその信頼性を検討している。現行の設計法では、これらの不確定要因によって危険側の波力が発生する可能性に対し、安全率を 1.2 とすることで設計に余裕をもたせているが、数値的な安全度を保証するものではない。防波堤の安全度を直接的に表す指標としては被災遭遇確率や期待滑動量をあげることができる。これらの指標は信頼性理論に基づいて計算することが可能である。例えば、高山ら (1991, 1994) や河合ら (1997) は堤体の滑動遭遇確率に加えて期待滑動量も算定する試みを行っている。また、下迫ら (1998) はモンテカルロシミュレーション法を用いた期待滑動量の計算を試みている。

本研究では、過去に行われた研究の成果をもとに、波向毎に変化する沖波の波高分布を考慮した期待滑動量、被災遭遇確率の計算を行い、防波堤の滑動安定性について検討を行った。

## 2. 被災遭遇確率と期待滑動量の計算方法

### 2.1 計算の概要

本研究では、下迫ら (1998) によるモンテカルロシミュレーション法に改良を加え、図-1 のようなフローで計算を行った。現行の設計法で設計した防波堤について、

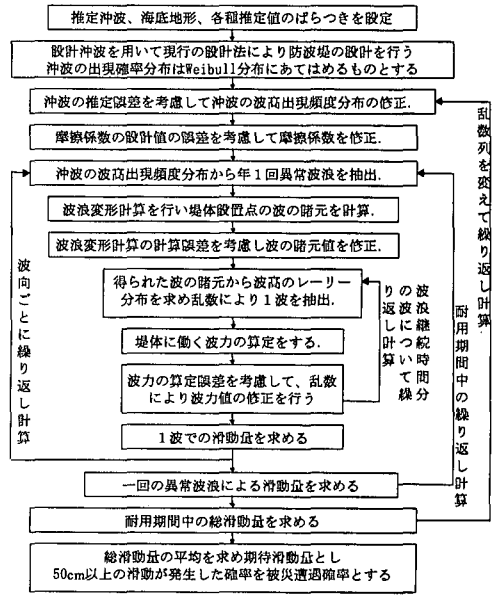


図-1 計算のフロー

耐用年数間の総滑動量を求める計算を多数回繰り返し、その平均値として期待滑動量を設定した。また、被災遭遇確率については総滑動量が 50.0 cm 以上の値となる計算結果の割合として求めた。ここで、耐用年数間の総滑動量は、1 年毎の滑動量の総和であり、基本的には 1 年毎の滑動量計算を繰り返し行っている。計算では、年 1 回発生する異常波浪が滑動に影響を及ぼすと仮定した。そして、沖波の波高出現頻度分布から無作為に抽出した異常波浪時の沖波に対して波浪変形計算を行い、防波堤に作用する波力を算定して 1 年毎の滑動量を計算した。ここで、防波堤に作用する不規則波列の波高分布はレーリー分布に従うと仮定した。ただし、砕波が生ずるような大きな波は除外した。この波高分布から暴風の継続時間に対応する波数分を乱数により無作為に抽出し、防波堤に作用する波を 1 波毎に再現した。この 1 波毎の波力を合田の波力公式によって計算し、堤体とマウンド間の摩擦力を考慮した堤体の運動方程式から滑動量を計算した。ここで、滑動量計算における不確定要因として

\* 正会員 工修 三菱重工業広島研究所鉄構・土木研究室  
\*\* フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所  
\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

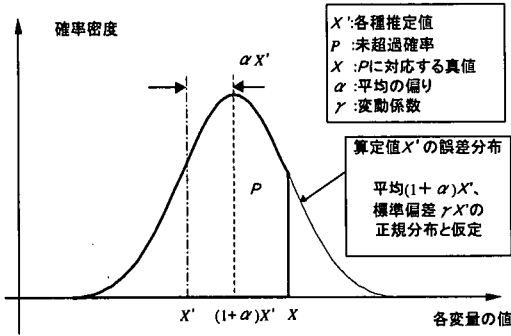


図-2 不確定要因値の修正概念図

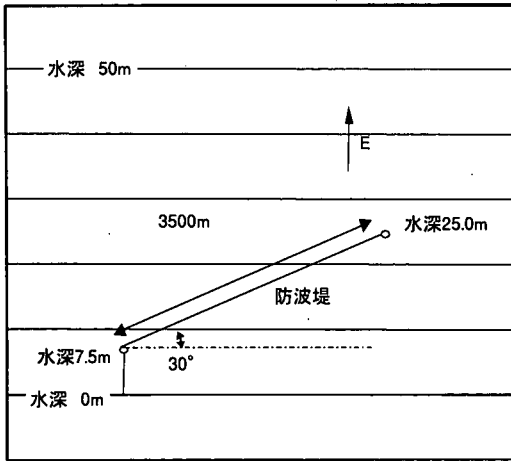


図-3 計算に用いた地形と防波堤の設置状況

は、沖波の波高出現頻度分布の推定誤差、波浪変形計算や波力公式の算定誤差、摩擦係数の誤差が考えられる。これらの不確定要因の値については図-2に示すような方法で修正を行い誤差を考慮することにした。まず、図に示すように不確定要因となる値  $X'$  に対して、実際の値は平均の偏り  $\alpha$  とばらつきを表す変動係数  $\gamma$  で正規分布していると仮定した。次に、乱数によって決定される未超過確率  $P$  を用いて、この分布から  $P$  に対応する値  $X$  を抽出し、滑動量計算で実際の値とみなすこととした。

計算に用いた地形は図-3に示すように岸方向に一樣の勾配 1/100 を設定し、防波堤は汀線に対して 30 度の角度を持つように設定した。

### 2.2 現行設計法による防波堤の設計

防波堤の耐用期間を 50 年とした。最大の波高をもつ波向の 50 年確率波に対して波浪変形計算を行い、防波堤設置地点での波の有義波高と最高波高を求める。堤体の天端高としては防波堤設置地点における有義波高の 0.6 倍の値が標準となっており、計算でもそれにしたがった。堤体幅については、まず、想定した堤体幅に対して堤体

重量を算定し、50 年確率波の波高を用いて波浪変形計算により防波堤設置地点における最高波高を求め、水平波力と揚圧力を合田式により算定して、この波力に対して防波堤の滑動安全率が 1.2 以上になることを確認した。安全率が 1.2 以上になるという条件が満たされない場合は、条件が満たされるまで堤体幅を増大させていった。今回の計算では滑動安定性に対してのみ安全率評価を行うことにした。

### 2.3 沖波の波浪条件

沖波の波浪条件としては、波向別に 50 年確率波を与え、これは平均的に年 1 回現れる異常波浪から推定されたと仮定した。そこで、防波堤の滑動量を計算する際は、推定誤差を考慮して 50 年確率波を修正し、修正した設計沖波波高に対応する沖波の波高出現頻度分布を求めた。この修正した波高出現頻度分布から無作為に耐用年数に相当する異常波浪を抽出し、この異常波浪に対応する不規則波列の波が暴風の継続時間に対応する波数だけ来襲するとした。各波向の継続時間は、波向が変化する時間を考慮して定めた。

### 2.4 波浪変形計算

今回の計算では、波浪変形計算にエネルギー平衡方程式を用いた。計算領域における格子幅は縦横 40 m とし、岸方向に 250、汀線方向に 200 の格子をとった。沖側境界に入力する方向スペクトルとしては有義波の波高と周期から定まる Bretschneider・光易型周波数スペクトルと光易型方向関数の積の形を用いた。また、今回の計算では波浪変形計算を頻繁に行うため、入力する沖波の波高、波向に対応した波浪変形計算の計算結果をあらかじめデータベース化し、計算の省力化を図った。

### 2.5 波力の時系列モデルと滑動量の計算

今回のシミュレーションでは防波堤設置地点に来襲する波を 1 波ずつ再現し、1 波ごとの波力を用いて滑動量計算を行っている。防波堤に働く 1 波の波力の時系列モデルとしては、下迫ら (1997) と同様に図-4 のような時系列モデルを用いた。ここに  $P_{1max}$  は重複波力のピーク値で合田式において衝撃波力係数を考慮しないときの水

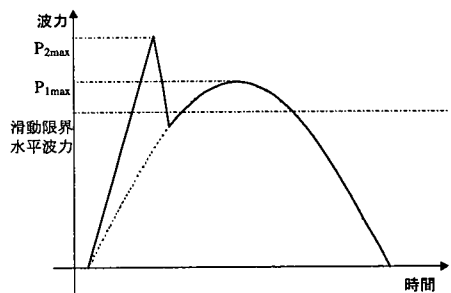


図-4 計算で用いた波力の時系列モデル

平波力、 $P_{2max}$ は衝撃波力のピーク値で合田式において衝撃波力係数を考慮したときの水平波力である。この図からわかるように、衝撃波力は三角パルス、重複波力は正弦波として考えている。また、波力の時系列モデルが求まると、堤体マウンド間の摩擦力との関係から堤体の運動方程式が得られる。それを2回積分することで堤体の移動量を求めた。

### 3. 期待滑動量および被災遭遇確率を用いた現行の設計法の安全性評価

#### 3.1 計算における設定条件

防波堤としては混成防波堤を考え、波浪条件としては年1回、継続時間3時間の暴風を設定した。その間に北東から東南東へと一様に変化する波浪の来襲方向を想定し、波向別に北東、東北東、東、東南東の4つに分割して、各波向から波浪が来襲する時間を45分とし、計算を行った。各波向の、50年確率波は表-1のように設定した。また、各波向毎の沖波波高の出現確率分布は独立であるととし、また、それぞれにWeibull分布の形状母数 $k=2.0$ を設定した。なお、沖波の波形勾配は0.035で一定とした。各設定値に対するばらつきは過去の研究を参考にして表-2のように設定した。期待滑動量、被災遭遇確率

表-1 波向ごとの沖波の推定50年確率波

波向	50年確率波波高
NE	7.0 (m)
ENE	9.5 (m)
E	8.0 (m)
ESE	6.5 (m)

表-2 計算で用いた不確定要因のばらつき

不確定要因	平均の偏り	変動係数
沖波	$\alpha_0 = 0.06$	$\gamma_0 = 0.11$
波浪変形	$\alpha_m = -0.03$	$\gamma_m = 0.04$
波力	$\alpha_p = -0.12$	$\gamma_p = 0.22$
摩擦係数	$\alpha_f = 0.06$	$\gamma_f = 0.16$

の計算は水深13, 16, 25 m地点に設置した堤体について行っており計算結果はすべてこの3箇所のケーソンについての値である。

#### 3.2 試行回数設定

本研究では耐用年数間の期待滑動量をモンテカルロ法により計算しており、試行回数は、乱数の初期値の違いによるばらつきが小さくなるよう、十分な回数に設定しなければならない。そこで、試行回数の期待滑動量計算結果に対する影響を検討した。図-5は試行回数 $N$ と期待滑動量 $S_E$ のばらつきを示す変動係数との関係を示したものである。この結果から、試行回数が10,000回の場合、期待滑動量の計算結果の標準偏差は平均値の10%程度に収まることが分かる。また、計算時間の面からも妥当であると考え、本研究では計算時間も考慮に入れ試行回数を10,000回に設定した。

#### 3.3 期待滑動量および被災遭遇確率の計算結果と考察

以上述べてきたような設定値を用いて、現行の設計法で設計した防波堤の期待滑動量および被災遭遇確率の計算を行った。計算結果は表-3のようになった。この結果からも分かるように設置水深に関わらず、堤体の期待滑動量が30.0 cm以内、被災遭遇確率が、5.0%以内に収まっており、安全率1.2を満たす設計は安全性をある程度保証しているといえる。

表-3 期待滑動量、被災遭遇確率の計算結果

	期待滑動量 (cm)	被災遭遇確率 (%)
水深13.0 m地点	24.50	4.52
水深19.0 m地点	12.10	2.58
水深25.0 m地点	13.50	2.70

### 4. 防波堤の安全性に対する各種不確定要因のばらつきの影響

#### 4.1 計算の設定条件

各種計算値、設計値の精度が変化する場合の期待滑動量、被災遭遇確率への影響を検討した。方法としては、各不確定要因のばらつきを表-2のように設定し、そのうちひとつについて変動係数を増減させ、期待滑動量、被災遭遇確率の変化を調べた。先ほどと同様に、地形条件は図-3、波浪条件は表-1のように設定した。

#### 4.2 防波堤の安全性に対する各変動係数の影響の比較

図-6と7は計算結果である。この結果からも分かるように算定精度、推定精度があがることによって安全性が飛躍的に向上する場合と、そうでない場合にわかれている。安全性が高まる場合としては、波力の算定誤差のばらつきが小さくなる場合である。図をみると、安全率1.2で設計した場合、波力の算定誤差の変動係数が0.19

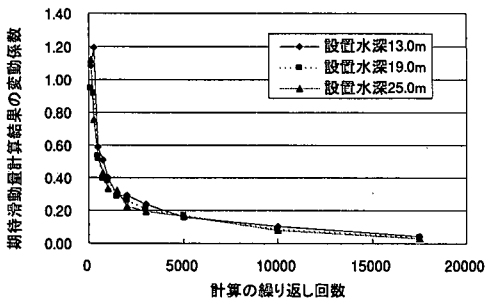


図-5 計算結果のばらつき

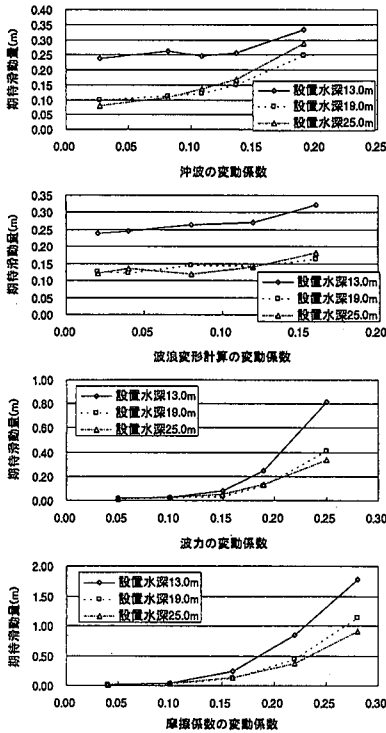


図-6 不確定要因の変動係数と期待活動量の関係

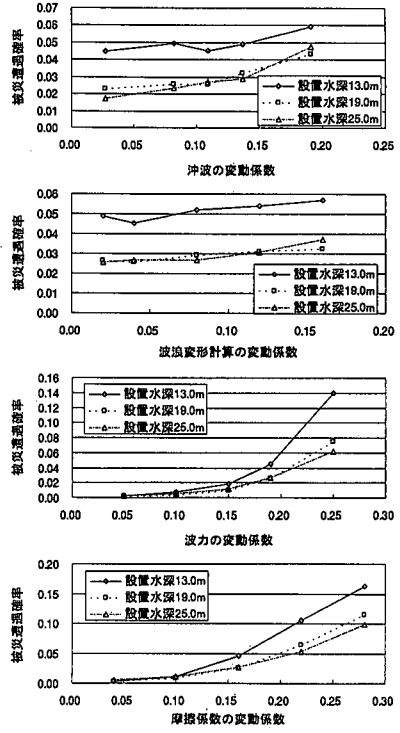


図-7 不確定要因の変動係数と被災遭遇確率の関係

から0.15に変化するだけで、期待滑動量は変動係数0.19における値の約1/3、被災遭遇確率も大体1/3程度にまで激減する。同様に、摩擦係数の設計値の誤差も防波堤の安全性にかなり大きく影響していることが図からわかる。これに対して沖波の推定誤差、波浪変形計算の誤差のばらつきが小さくなくても、安全性にはほとんど影響がない。例えば、沖波の推定における誤差のばらつきについてみてみると、沖波の推定誤差の変動係数が0.110から0.082に変化しても期待滑動量、被災遭遇確率の値にほとんど変化はなく、0.110から0.027へ変化することによって0.110の時の値に対して2割程度の変化をみせるだけである。波浪変形計算の場合も同様で、図-6と7からも分かるように現在分かっている変動係数0.04という精度がさらに向上したとしても期待滑動量、被災遭遇確率の値はほとんど変化しない。以上のことを考えると、防波堤の設計において安全性をさらに向上させるためには波力の算定誤差、摩擦係数の誤差のばらつきをいかに小さくしていくかが重要となる。精度が高まれば、安全率を小さくしても防波堤の安全性を確保でき、より低コストな設計が可能になるといえる。

## 5. 波向変化特性と防波堤の滑動安定性

### 5.1 計算の設定条件

これまで、安全率や、設計値に対する真値のばらつき

を変化させ期待滑動量、被災遭遇確率の変化をみてきた。しかし、今回はエネルギー平衡方程式を用いた平面の波浪変形計算を行っており、入力する沖波として時間的に変化する波向をもつ異常波浪を用いている。波浪の波向き別分布も防波堤の安全性に影響すると考えられ、これについて検討した。まず、各波向によって波高を変化させ、そのときの期待滑動量、被災遭遇確率の変化をみた。防波堤は安全率1.2で設計し、不確定要因のばらつきは表-2で与えられたものを用いた。波浪条件としては先ほどと同様、変化する波向を想定し、波向を北東、東北

表-4 計算で使用した50年確率波の波高分布

(a) 波浪の来襲方向がEの時沖波波高がピークとなる場合各来襲方向における50年確率の沖波波高(m)

	NE	ENE	E	ESE
case 1	9.50	9.50	9.50	9.50
case 2	8.55	9.03	9.50	9.03
case 3	7.60	8.55	9.50	8.55
case 4	6.65	8.08	9.50	8.08
case 5	5.70	7.60	9.50	7.60

単位: (m)

(b) 波浪の来襲方向がENEの時沖波波高がピークとなる場合各来襲方向における50年確率の沖波波高(m)

	NE	ENE	E	ESE
case 1	9.50	9.50	9.50	9.50
case 2	9.03	9.50	9.03	8.55
case 3	8.55	9.50	8.55	7.60
case 4	8.08	9.50	8.08	6.65
case 5	7.60	9.50	7.60	5.70

単位: (m)

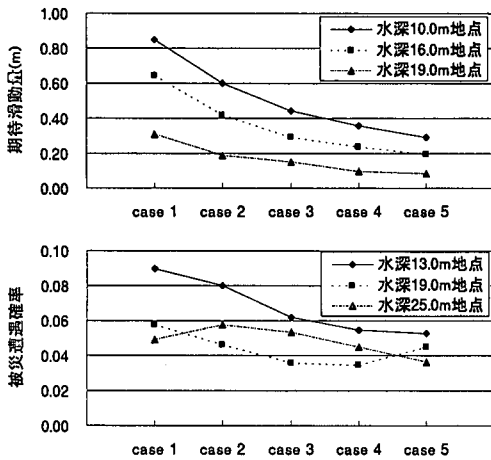


図-8 50年確率波の波高がEでピークとなる場合の期待滑動量と被災遭遇確率

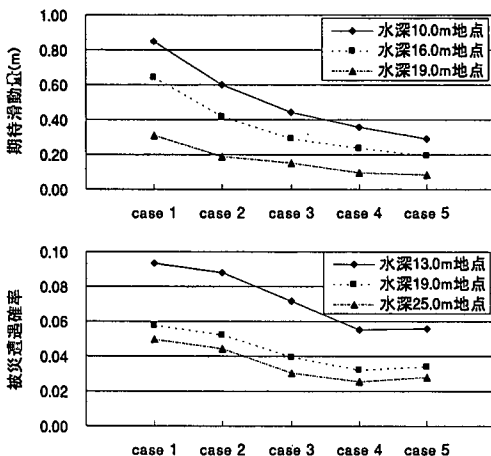


図-9 50年確率波の波高がENEでピークとなる場合の期待滑動量と被災遭遇確率

東, 東, 東南東の4つに分割し各波向に対して50年確率波を設定したが, ここで50年確率波の設定方法として以下の2ケースを考えた。まず, 1ケース目としては, 波向が東のときの設計沖波波高がピークとなるような条件を与え, 2ケース目は波向が東北東のときの設計沖波波高がピークとなるような条件を与えることとした。50年確率波の波高としては2つのケースともにピーク値を固定し, 各波向について値を表-4のように変化させた。なお, 波高がピークとなる波向の50年確率波を設計沖波として, これに対して現行の設計法による防波堤の滑動安定性の評価を行い, 設計値を求めた。また, 計算は設置水深が10, 16, 19mの堤体について行った。

5.2 計算結果と考察

図-8と9は計算結果であるが, 50年確率波の波向による変化が小さい場合は, 期待滑動量, 被災遭遇確率と

もに大きく, 防波堤の安全性も低下する。また, 図からもわかるように, 波向が東の時に50年確率波がピークとなる場合は, 全体的に期待滑動量が大きくなっている。これは, 波高がピークとなる波向の50年確率波が, 防波堤の法線方向に対して斜めの角度をもって入射するため, 設計波力が弱めに見積もられ, 堤体の設計値が危険側の値となっているためである。よって, 波高がピークとなる50年確率波の周辺の波向で波高値が高い場合は, 堤体が滑動しやすいといえる。このように, 単に最大の50年確率波が来襲する波向における波高分布だけでなく, その周辺の波向の波高にも配慮が必要であるといえる。

6. あとがき

本研究で得られた主要な結論は以下のようになる。

- 1) 安全率1.2の設計は, 期待滑動量が30.0cm以内, 被災遭遇確率が5.0%以内となり比較的安全な設計だといえる。
- 2) 期待滑動量および被災遭遇確率は, 沖波波高の推定値, 波浪変形計算の計算値のばらつきにはさほど影響を受けないが, 波力公式による算定値, 摩擦係数の設計値のばらつきには大きく影響される。よって, 防波堤の滑動安定性を高めるには, これらの精度を高める必要があるといえる。
- 3) 単に波高が最大となる波向の50年確率波のみを用いて設計を行うと堤体の設計値は危険側となることもある。よって, 設計時には単に50年確率波の波高が最大となる波向の波高分布だけでなく, その周辺の波向の波高分布にも配慮が必要である。

参考文献

河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997): 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. 3-41.  
 下迫健一郎・高橋重雄 (1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 831-835.  
 下迫健一郎・高橋重雄・高山知司・谷本勝利 (1998): 変形を考慮した混成防波堤の新設計法の提案, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 801-805.  
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680.  
 高山知司・池田直太 (1991): 現行設計法における防波堤の滑動安定性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 641-645.  
 高山知司・池田直太 (1991): 防波堤の信頼性設計法について, JCOSSAR '91論文集, pp. 245-252.  
 高山知司・藤井久 (1991): 信頼性理論による防波堤の滑動安定性に関する理論的検討, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第4号, pp. 35-64.