

混成堤の性能照査型設計法における滑動量の 許容値設定に関する検討

下 迫 健 一 郎*・多 田 清 富**

混成堤の性能照査型設計法における滑動量許容値の指標として、期待滑動量、ある滑動量の超過確率、確率波に対する平均滑動量などが提案されている。本研究では、これらの指標の特性を明らかにするとともに、実際の設計において最適と考えられる、より汎用的な許容値の設定法について検討を行った。その結果、水深や高波の出現特性によって、各指標の相関関係は大きく変化することがわかった。また、複数の滑動量に対して超過確率を設定し、構造物に応じてその許容値を変える方法を提案した。この方法により、どのような設計条件でもほぼ同じ程度の安定性を有する、信頼度の高い混成堤の設計が可能となる。

1. ま え が き

ISO 規格の導入により、港湾構造物の設計でも従来の仕様規定型から性能規定型への移行が急がれている。混成堤の耐波設計においても、性能設計法に関する数多くの研究が行われており、特に、直立部の滑動安定性に関しては、変形を考慮した種々の信頼性設計法が提案されている。たとえば、著者ら (1998) は、数値シミュレーションにより算定した供用期間中の期待滑動量 (総滑動量の平均値) を指標とする設計法を提案した。これに対して、高橋ら (2000) は、50 年および 500 年確率波に対する滑動量の平均値を指標とし、構造物の重要度に応じて許容値を変える方法を提案した。また、合田 (2001, 2002) は、信頼性設計法における波浪の極値分布の影響を指摘し、裾長さパラメータを提案するとともに、期待滑動量の代わりに総滑動量の超過確率を指標とする方法を示した。そのほか、花山ら (2002) は台風モデルを用いた信頼性設計法について検討しており、赤石沢ら (2002) は安全係数を用いた滑動量算定法について検討を行っている。

本研究では、滑動量に関する各種指標の特性とその相関関係について、高波の出現特性および水深 (碎波限界波高) 等の影響を明らかにするとともに、設計条件に関係なく適用可能な、より汎用的な指標とその許容値の設定方法について検討を行う。

2. 数値シミュレーションの方法

滑動量に関する計算はモンテカルロ・シミュレーションを用い、沖波、摩擦係数、波力等の各種不確定要因の設定については、原則として著者ら (1998) の方法と同じである。計算に当たっては、現実にはあり得ない過大な滑動を除去するため、1 回の試行における滑動量の上限値を、ケーソンがマウンドから転落するまでの距離に相当する 20 m とした。

高波の出現特性について、合田 (2001, 2002) は極値分布関数の裾の広がり具合を表すパラメータとして、50 年確率波高と 10 年確率波高の比で定義される裾長さパラメータ γ_{50} を提案している。今回の計算では、以下に示す γ_{50} の値の異なる 3 種類の極値分布を対象とし、いずれも 50 年確率沖波波高 H_{0D} が 9.2 m となるよう設定した。

①ワイブル分布, $k=1.0$ ($\gamma_{50}=1.38$)

②ワイブル分布, $k=1.4$ ($\gamma_{50}=1.07$)

③極値 I 型 ($\gamma_{50}=1.22$)

水深 h については 10~30 m まで 5 m 刻みとした。また、潮位については原則として H.W.L. を +0.5 m としたが、比較のため、一部 +2.0 m のケースも行っている。なお、堤体幅については、実際の設計を考慮して 0.1 m 単位で変化させた。そのため、各指標の値は目標値と必ずしも正確には一致していない。また、防波堤の供用期間は 50 年と仮定し、50 年間の総滑動量の計算を、乱数を変化させて 5000 回繰り返し、期待滑動量および総滑動量の超過確率を求めた。なお、50 年確率波、500 年確率波など、ある再現期間の高波が 1 回来襲したときの滑動量については、50000 回の繰り返し計算の平均値で定義している。

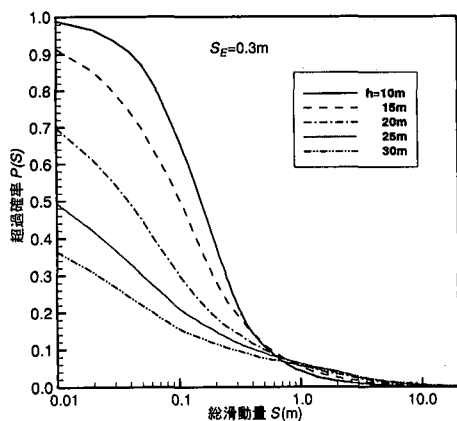
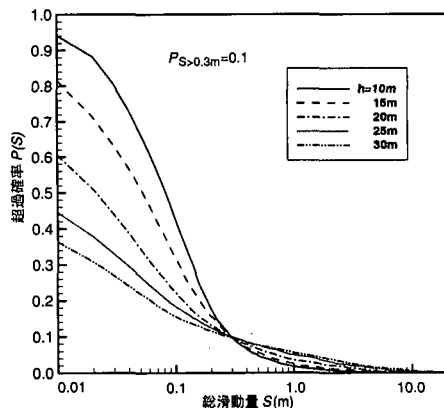
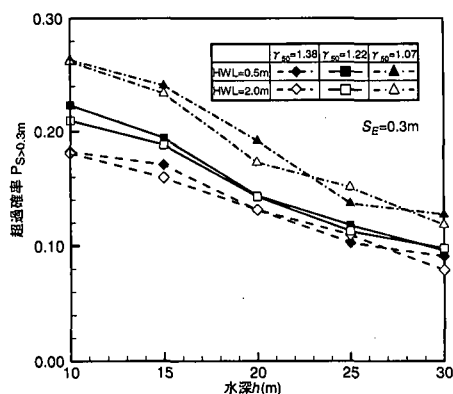
3. 滑動量に関する各種指標の比較

(1) 期待滑動量と超過確率

期待滑動量という供用期間中の総滑動量の平均値を用いる方法は、感覚的には比較的わかりやすい概念ではあるものの、実際にどの程度の滑動がどのくらいの確率で起こるのかは明示されない。そこで、まず供用期間中の総滑動量の頻度分布について、5000 回の計算結果を超過確率で整理した。図-1 は、期待滑動量が 0.3 m となる断面を対象として、水深の違いによる分布の変化を示したもので、H.W.L.=0.5 m, $\gamma_{50}=1.22$ における結果である。 $h=10$ m の場合、総滑動量 0.01 m 以下が全体の 1.2%, 0.01~0.1 m が 32.1%, 0.1~0.3 m が 44.3% と比較的小さい滑動が生じる割合が高いのに対して、1.0 m 以上は 4.2% に過ぎない。これは、水深が小さいためにある程

* 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室長

** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室

図-1 総滑動量の超過確率 ($S_E=0.3\text{m}$)図-3 総滑動量の超過確率 ($P_{S>0.3\text{m}}=0.1$)図-2 総滑動量が0.3m以上となる確率 ($S_E=0.3\text{m}$)

度以上の大きな波は碎波し、波高が頭打ちとなるためである。一方、 $h=30\text{m}$ の場合、総滑動量0.01m以下が全体の63.6%を占めるものの、1.0m以上が5.6%で、 $h=10\text{m}$ の場合の1.33倍となっており、水深が小さい場合に比べると大きな滑動が生じやすいことがわかる。

図-2は、期待滑動量が0.3mとなる断面において総滑動量が0.3m以上となる確率が、水深、高波の出現特性、潮位によってどのように変化するかを示したもので、横軸は水深である。図-1からも明らかなように、水深が小さいほど超過確率が大きくなっている。また、 γ_{50} の値が小さいほど超過確率は大きい。これは、 γ_{50} の値が小さいと極端に大きな波高が発生しにくいため、0.3~1.0m程度の滑動量となる割合が比較的高くなるためである。なお、潮位偏差の違いによる差はあまり顕著ではない。

図-3は、総滑動量が0.3m以上となる確率が10%となる断面について、図-1と同様に示したものである。水深が大きい場合は図-1とほぼ同じであるが、水深の小さい場合は全体的に滑動量が小さくなっており、 $h=10\text{m}$ の場合、0.01m以下が全体の5.9%、0.01~0.1mが51.7%、0.1~0.3mが32.8%で、1.0m以上は1.8%と

さらに小さくなっている。すなわち、合田(2001)も指摘しているように、水深が小さい場合には総滑動量の分布幅が狭いことがわかる。ちなみに、滑動量0.3mの超過確率が10%である各断面の期待滑動量は、 $h=30\text{m}$ で0.293m、 $h=20\text{m}$ で0.189mであり、 $h=10\text{m}$ では0.159mとかなり小さい。

ある滑動量に対する超過確率を同じにしても、別の滑動量に対する超過確率は必ずしも同じにはならない。図-4(1)、(2)は、総滑動量が0.3m以上となる確率が10%となる断面について、総滑動量が0.1mおよび1.0m以上となる確率を、図-2と同様に示したものである。0.1mの超過確率については、水深が小さいほど、また、 γ_{50} の値が小さいほど大きい。一方、1.0mの超過確率については、逆に水深および γ_{50} の値が大きいほど大きい。これは、滑動量が1.0m以上となるのは波高がかなり大きい場合であり、水深が小さい場合や γ_{50} の値が小さい場合には極端に大きな波高が発生しにくいためである。

(2) 現行設計法との堤体幅比較

図-5は、期待滑動量が0.3mとなる断面と、総滑動量

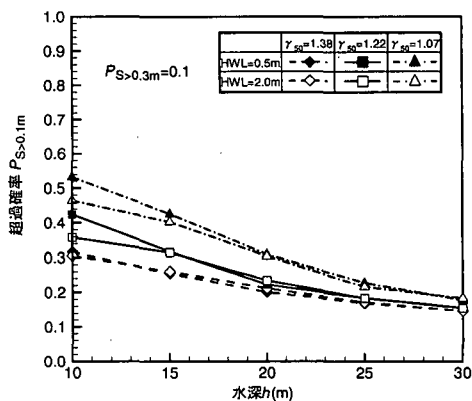


図-4(1) 総滑動量が0.1m以上となる確率

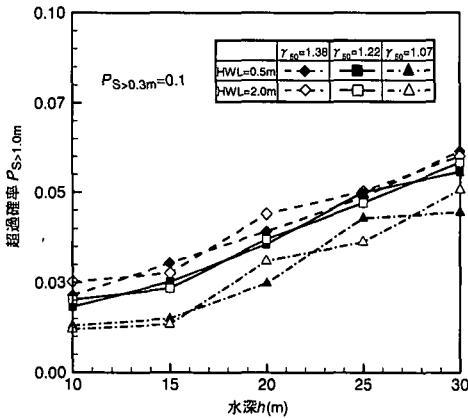


図-4(2) 総滑動量が1.0 m以上となる確率

が0.3 m以上となる確率が5, 10, 15%となる断面について、それぞれの堤体幅を現行設計法(滑動安全率1.2)の堤体幅で無次元化して示したもので、横軸は水深と50年確率沖波波高の比である。水深20 m以下の砕波領域ではどの断面も現行設計法の断面より小さく、水深25 m以上では大きい。また、同じ超過確率の断面で比較すると、 $\gamma_{50}=1.38$ のほうが $\gamma_{50}=1.07$ よりも全体的に小さい。期待滑動量0.3 mの断面は、 $\gamma_{50}=1.38$ および1.22の場合、砕波領域では超過確率15%、非砕波領域では10%の断面に近く、 $\gamma_{50}=1.07$ の場合、全体的に15%の断面に近い。

(3) 確率波に対する滑動量

図-6は、期待滑動量が0.3 mとなる断面を対象として、ある再現期間の高波1回(継続時間2時間)に対する滑動量について、水深および高波の出現特性による違いを示したものである。再現期間が50年よりも長い場合は、 $\gamma_{50}=1.38$ のほうが $\gamma_{50}=1.07$ に比べて沖波波高の絶対値が大きいため、滑動量も大きくなっている。また、 $\gamma_{50}=1.38$ の場合、水深が大きくなるほど再現期間が長く

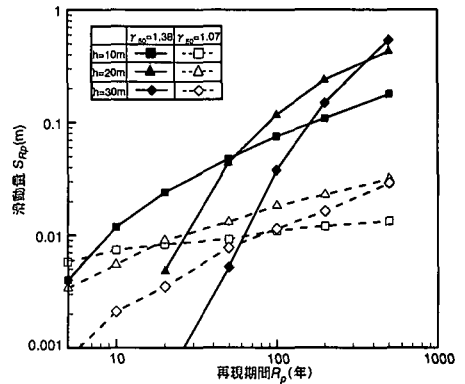


図-6 設計波の再現期間と滑動量 ($S_E=0.3$ m)

なることによる滑動量の増加が顕著である。これは、水深が小さい場合、沖波波高は大きくても砕波の影響によって、堤体位置での波高が頭打ちになってしまうことの影響である。

図-7は、総滑動量が0.3 mを超過する確率が5, 10, 15%のそれぞれの断面について、ある再現期間の高波1回に対する滑動量を図-6と同様に示したもので、水深20 mの例である。例えば500年確率波が作用したとき、 $\gamma_{50}=1.07$ の場合、超過確率15%の断面でも滑動量は0.02 m程度であるのに対して、 $\gamma_{50}=1.38$ の場合、超過確率5%の断面でも約0.13 mとなり、高波の出現特性の影響が極めて大きいことがわかる。なお、紙面の関係で示していないが、水深が異なる場合についても、全体的な傾向は同じであるが、図-6からも推測できるように、水深が小さい場合には砕波による波高の頭打ちの影響を受けるため、500年確率波でも滑動量はそれほど大きくならない。

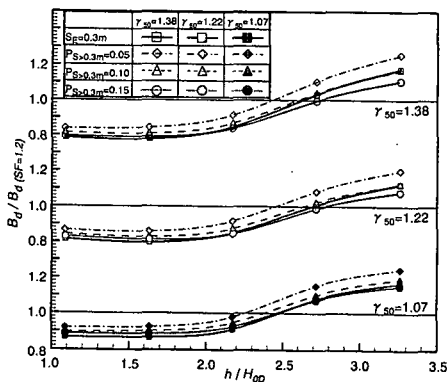


図-5 各指標から計算される堤体幅の比較

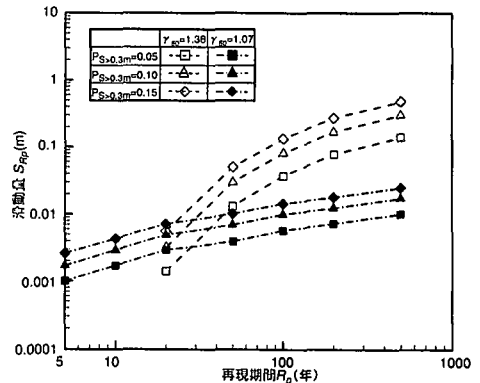


図-7 設計波の再現期間と滑動量 ($P_{S>0.3m}=0.05\sim0.15$)

4. 各種指標における不確定要因の影響

(1) 計算の繰り返し回数

期待滑動量を指標とする場合、計算の繰り返し回数が少ないと、ある試行で極端に大きな滑動量となった場合、それによって平均値である期待滑動量も大きくなってしまふ。そのため、計算結果が安定となるよう十分な繰り返し回数を取る必要がある。一方、超過確率を指標とする場合、滑動量の平均値を用いることはないので、たまたま大きな滑動量となっても、計算結果にはあまり影響しないと考えられる。したがって、期待滑動量を指標とする場合に比べて、少ない繰り返し回数で安定な結果が得られることが予想される。そこで、期待滑動量が0.3 mとなる断面と滑動量が0.3 mを超える確率が0.15となる断面がほぼ同じとなる条件の水深20 m、 $\gamma_{50}=1.22$ の場合について、計算の繰り返し回数の影響を調べた。

図-8(1)は、計算回数と期待滑動量のばらつきの例を示したもので、各試行回数ごとに乱数の初期値を変えた10通りの計算を行い、最大値、最小値、平均値、標準偏差を求めている。一方、図-8(2)は、図-8(1)と同じ断面について、超過確率が15%となる滑動量について同様に示したものである。超過確率15%を指標とした場合、繰り返し回数3000回で、期待滑動量を指標とした場合における繰り返し回数5000回の場合とほぼ同じ標準偏差となっており、少ない繰り返し回数で安定な結果が得られることがわかった。ただし、ここには示していない

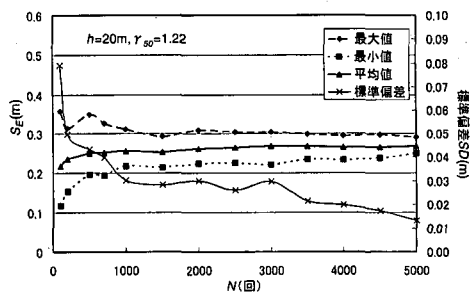


図-8(1) 計算回数と滑動量のばらつき ($S_d=0.3$ m)

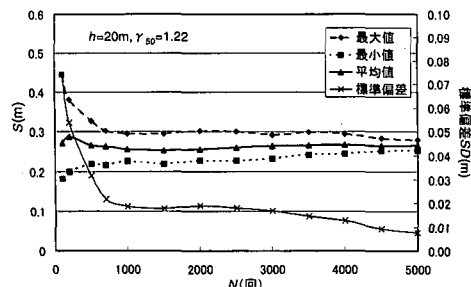


図-8(2) 計算回数と滑動量のばらつき ($P_{S>0.3m}=0.1$)

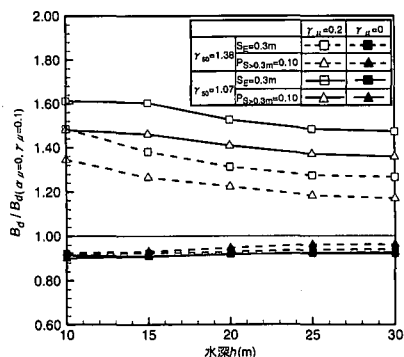


図-9 摩擦係数の変動係数による堤体幅の変化

いが、超過確率10%を指標とした断面については、期待滑動量を指標とした場合とあまり差は見られなかった。

(2) 摩擦係数のばらつき

超過確率を指標とした場合、期待滑動量を指標とした場合に比べて、計算回数が少なく済むだけでなく、摩擦係数、波力、沖波波高などの不確定要因の変動による影響も少なくなる可能性がある。図-9は、摩擦係数のばらつきに関する変動係数 γ_{μ} を、標準値の0.1から0および0.2に変更した場合に得られる堤体幅について、標準値の場合の堤体幅で無次元化して示したものである。超過確率を指標としたほうが堤体幅の変化の割合が小さく、不確定要因の推定誤差の影響が小さいと考えられる。なお、波力および沖波波高についても同様の検討を行ったが、波力については、摩擦係数の場合ほど顕著な結果は得られなかった。また、沖波波高については、水深が小さい場合、碎波の影響で変動係数に関係なく堤体幅がほとんど同じになってしまうため、指標の違いによる影響は確認できなかった。

5. 構造物の重要度を考慮した滑動許容値の設定方法

(1) 確率波に対する滑動量を指標とする設計法

構造物の重要度を考慮した設計法の一つとして、これまでに「確率波に対する滑動量の平均値を用いる方法」が提案されている(Takahashiら, 2001)。表-1は重要度別の許容滑動量の設定例を示したものである。

例えば重要度Bの場合、5年確率波に対する平均滑動量が0.03 m以下、同様に、50年確率波に対して0.1 m以下、500年確率波に対して0.3 m以下をすべて満たすように断面を決める。そのため、水深や高波の出現特性によって、どの確率波で断面が決まるかわ変わってくる。この方法では、確率波に対する変形量(平均値)が明示されるため、感覚的にはわかりやすい。ただし、前述のように、実際にどの程度の変形がどのような確率で起こるのかについては明確でない。また、水深が小さく碎波に

表一 重要度を考慮した許容滑動量の設定例

		許容滑動量 (m)			
		0.03	0.1	0.3	1.0
再 現 期 間	5 年	B	C		
	50 年		B	C	
	500 年	A		B	C
	5000 年		A		

※構造物の重要度 A：高い, B：普通, C：低い

表二 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
滑 動 量	0.1 m	15%	30%	50%
	0.3 m	5%	10%	20%
	1.0 m	2.5%	5%	10%

よって波高が頭打ちとなるような場合や、 γ_{50} の値が小さい場合は、再現期間の影響が小さくなる。したがって、この方法を用いる場合、設計条件に応じて許容滑動量または再現期間を変える必要がある。

(2) 滑動量と超過確率を指標とする設計法

超過確率を指標とする方法は被災の危険性をより定量的に評価することができ、期待滑動量を指標とする方法よりも合理的な設計法と考えられる。ただし、これまでの検討からもわかるように、たとえば滑動量が0.3 m以上となる確率を10%以下としても、水深や高波の出現特性によって、滑動量が1.0 m以上となる確率は大きく異なる場合もある。そこで、より信頼度の高い設計法として、上述の確率波に対する滑動量を指標とする方法と同様に、複数の滑動量に対して超過確率を考慮し、構造物の重要度に応じて許容超過確率を変える方法を提案する。

表二は重要度別の滑動量とその許容超過確率の設定例を示したものである。表中の滑動量とは、供用期間全体での総滑動量のことであり、滑動量0.1 mは目視で確認できる値、1.0 mはこれ以上大きくなると重大な被災につながる値としての目安である。また、許容超過確率の数値は、今回の検討結果に基づく参考値である。

この基準に従うと、例えば重要度を普通とした場合、今回対象とした計算ケースでは、水深10および15 mで $\gamma_{50}=1.07$ および1.22の場合には0.1 m-30%の条件、水深30 mで $\gamma_{50}=1.38$ および0.22の場合には1.0 m-5%の条件、それ以外の場合は0.3 m-10%の条件で断面が決まる。

なお、0.3 m以下の小さい滑動に関しては十分に許容

できる場合、0.1 mの超過確率は考慮せず、0.3 mと1.0 mの超過確率のみで設計することも考えられる。

6. ま と め

今回の研究における主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 期待滑動量が同じであっても、滑動量の頻度分布は高波の出現特性や水深によって大きく変化する。また、ある滑動量の超過確率を同じにしても、別の滑動量の超過確率は必ずしも同じにはならない。
- 2) 滑動量が0.3 m以上となる確率が10%の断面は、非碎波領域では期待滑動量0.3 mとなる断面とほぼ等しく、碎波領域ではやや大きくなる。
- 3) ある再現期間の高波1回に対する滑動量は、当然ながら再現期間が長いほど大きくなり、水深が大きくなるほど、また、 γ_{50} の値が大きくなるほどその傾向が顕著である。
- 4) 複数の滑動量に対して超過確率を設定し、構造物の重要度に応じてその許容値を変える方法を提案した。この方法を用いると、高波の出現特性や水深によって断面を決定する滑動量の条件が異なり、どのような設計条件でもほぼ同じような安定性を有する、信頼度の高い設計が可能となる。

なお、今回提案した設計法を実際の設計に適用する場合、許容値の設定についてさらに検討が必要である。

本研究の実施に当たっては、港湾空港技術研究所の高橋統括研究官から貴重な助言をいただいている。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 赤石沢総光・長船 徹・興野俊也・阿部光信 (2002): 安全係数を用いた防波堤滑動量算定手法の構築に関する検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 946-950.
- 合田良実 (2001): 防波堤の信頼性設計における極値分布の選択とその影響, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 1-6.
- 合田良実 (2002): 設計波高に係わる極値統計分布の極長度パラメータとその意義, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 171-175.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法, 港研報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.
- 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳 (2000): 防波堤の安定性照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計—, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 415-420.
- 花山格章・関本恒浩・鶴岡亮行・高木泰士・畑田佳男・山口正隆 (2002): 確率的台風モデルを用いた信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 926-930.
- Takahashi, S., K. Shimosako, and M. Hanzawa (2001): Performance design for maritime structures and its application to vertical breakwaters —caisson sliding and deformation-based reliability design—, Proc. Advanced design of maritime structures in the 21st century, Port and Harbour Research Institute, pp. 63-73.