

変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案

——期待滑動量を用いた信頼性設計法——

下迫健一郎*・高橋 重雄**・高山 知司***・谷本 勝利****

1. ま え が き

混成堤直立部の耐波安定性に関する設計法については、すでに 19 世紀から長年にわたって研究が進められており、現在ではほぼ確立された段階にある。しかしながら、その設計法は基本的には古くから変わっておらず、設計波を対象とし、波力による外力と直立部の重量による抵抗力を考え、安定か不安定かを判断するものである。

現在、土木構造物の経済性の向上が急務となっており、新形式の防波堤構造や新たな施工法によるコストの縮減が考えられている。しかしながら、著者らは設計法の高度化によってもコストの縮減が可能と考えており、混成堤の新たな設計法を検討している。

本研究は、混成堤の滑動安定性に関して新しい設計法を提案するもので、安定か不安定かの判定だけでなく、その変形量（滑動量）を考慮する設計法であり、また、一つの設計波だけを対象とするのではなく、耐用期間中に発生する全ての異常波浪を考慮するものである。著者らは、この設計法を「混成堤の期待滑動量を用いる信頼性設計法」と呼んで検討を進めている。ここでは、その基本的な考え方と具体的な適用方法について報告する。

2. 期待滑動量を用いる設計法の概要

図-1 は、新しい設計法について現行設計法との関係から説明したものである。現行設計法では、合田(1973)による波力算定式（合田式）を用いて滑動波力を計算し、直立部の重量による滑動抵抗力との比による滑動安全率が 1.2 以上となるように設計している。

これに対して、伊藤ら(1966)は設計波に対する変形量（滑動量）を考慮した設計法を提案し、設計波に対する滑動量の期待値を期待滑動量と名付けた。その後、堀川ら(1972)も期待滑動量に関する研究を進めており、期待滑動量を実際の設計に取り入れようとする動きもあった。しかしながら、当時は波力算定式などに問題があり実現しなかった。その後、合田式が提案されて波力

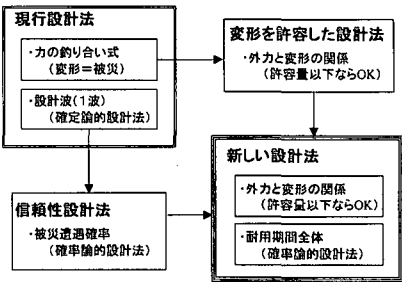


図-1 現行設計法と新しい設計法の関係

算定精度が飛躍的に向上したが、衝撃碎波力などの問題が残っていた。著者らは、衝撃波力に対するケーソンの動的応答の検討（高橋ら, 1994）を進めるとともに、動的応答をある程度考慮した衝撃波力の算定法（高橋ら, 1992）も提案し、さらに、最近では滑動量の算定法についても検討を進めている（下迫・高橋, 1994；谷本ら, 1996）。

一方、これまで多くの分野で被災確率を考慮した信頼性設計法が研究されており、港湾構造物の分野でも、新構造のケーソン部材設計に信頼性設計法の一つである限界状態設計法が適用された例がある。最近では、ケーソンの滑動安定性についても確率論的設計法の検討が進められており、耐用期間中の被災遭遇確率が計算できるようになっている（外山, 1985；高山ら, 1991；高山ら, 1994；長尾ら, 1995；河合ら, 1997）。

今回提案する設計法は、こうした現行設計法における二つの問題点を解決するものであり、耐用期間中の変形量の期待値（期待滑動量）を計算して設計するものである。すなわち、これまでの滑動安全率に代わる新しい指標として期待滑動量を用い、これが許容値以下となるように設計する。期待滑動量の計算には、モンテカルロ法（下迫・高橋, 1997）による確率計算を用いている。

図-2 は、期待滑動量の基本的な計算フローを示したものである。沖波の推算から 1 回の高波による滑動量までの計算を 50 回繰り返して、耐用期間中の総滑動量を計算する過程を 1 回の試行とする。この試行を乱数を変えて 5000 回行い、その平均値を期待滑動量と定義する。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長
*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
**** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

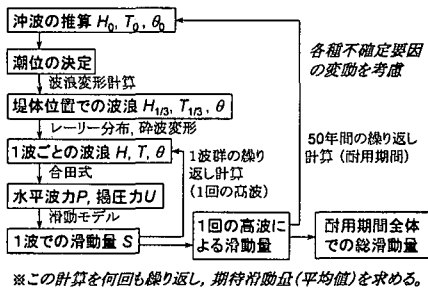


図-2 期待滑動量の計算フロー

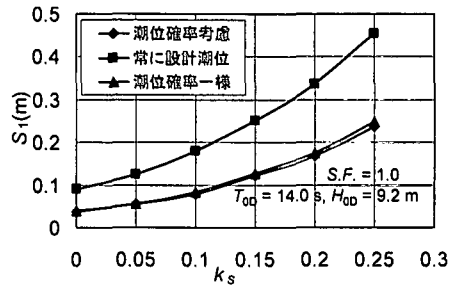


図-3 天文潮位および高潮係数と期待滑動量

3. 期待滑動量における計算条件の設定

3.1 考慮すべき計算条件

- ① 高波: 高波の発生を1年に1回と仮定し、ワイブル分布に基づいて異常波浪を発生させ、沖波波高 H_0 を求める。高波の有効継続時間は2時間とする。
- ② 天文潮位: HWL から LWL までの潮位の発生確率分布を考慮する。
- ③ 高潮偏差: 地形条件等によって大きく異なるが、沖波波高 H_0 に比例して水位が上昇するものと仮定する。
- ④ 波浪変形: 沖波波高 H_0 から堤体位置での有義波高 $H_{1/3}$ を求めるため、砕波を含めた波浪変形計算を行う。ただし、屈折および回折は考慮しない。
- ⑤ 摩擦係数: 通常用いられている値 0.6 を用いる。
- ⑥ 1波ごとの波高: レーリー分布に基づいて、堤体位置での有義波高 $H_{1/3}$ から1波ごとの波高を再現する。このとき、砕波による波高分布の変化も考慮する。周期は波高に比例させる。ただし、設計有義波高の0.75倍以上の波高については、すべて設計有義波周期を用いる。また、波向きはすべて沖波の主波向きと同じとする。
- ⑦ 波力: 合田式を用い、衝撃砕波力については高橋ら(1994)の衝撃砕波力係数 a_l を用いて補正する。
- ⑧ 滑動量: 下迫ら(1997)の滑動モデルを用いて計算する。

3.2 不確定要因の検討

3.1 で示した各種の不確定要因については、原則として正規分布のばらつきを考慮し、平均値の偏り α と変動係数 γ について適切な値を与えた。ここでは、いくつかの不確定要因について、変動と期待滑動量の関係について検討した結果を示す。なお、本節における検討は、原則として水深 $h=20$ m, $H_{0D}=9.20$ m, $T_{0D}=14.0$ s, 波向きは直角入射, 滑動安全率 $S.F.$ は 1.0 として行った。その他の詳細な条件は次章と同じである。

a) 天文潮位と高潮変動

図-3は、天文潮位と高潮偏差の変動と、設計波(50年確率波)相当の波群が1回(2時間)作用したときの期待滑動量 S_1 の関係を示したものである。

天文潮位については、河合ら(1997)の検討結果をもとに、HWL および LWL となる確率が最も低く、中間の潮位となる確率が最も高くなるよう発生確率を近似したケース、常に設計潮位(HWL)を用いたケース、すべての潮位の発生確率を一樣としたケースの3つを考えた。

一方、高潮偏差は有義波高に比例するものとした。図-3において、横軸は高潮偏差と有義波高の比例定数 k_s である。すなわち、 $k_s=0.1$ であれば、有義波高 $H_{1/3}=5$ m のとき、高潮偏差の平均値は 0.5 m となる。ただし、ばらつきとして正規分布を仮定し、平均値の偏り α_{ST} を 0、変動係数 γ_{ST} を 0.10 としている。

天文潮位については、常に設計潮位で計算すると滑動量はかなり大きくなるが、発生確率を考慮した場合とすべての潮位を同じ発生確率とした場合とではほとんど滑動量に差がない。一方、高潮偏差については、当然ながら k_s が大きいほど滑動量も大きく、どのケースについても k_s が 0.1 増えると期待滑動量はほぼ2倍になる。

b) 波力

波力については、合田式による計算波力と実際の波力との誤差のばらつきを考慮する必要がある。実際のばらつきは、たとえば砕波・非砕波など種々の条件によって異なるはずであるが、ここでは、そのような影響は考慮せず、すべて同じ正規分布のばらつきを仮定し、平均値の偏り α_F および変動係数 γ_F の値によって期待滑動量がどのように変化するかを検討した。

図-4は、横軸に変動係数 γ_F をとり、縦軸は図-3と同様に設計波1波群相当の期待滑動量 S_1 をとって示したものである。滑動量は、 α_F だけでなく γ_F によっても大きく変化しており、特に、 γ_F が 0.10 以上になると、期待滑動量は急激に増大することがわかる。

c) 沖波

ワイブル分布に基づく沖波の推算値についても、真値との誤差のばらつきとして正規分布を仮定し、平均値の偏り α_0 および変動係数 γ_0 の値による期待滑動量の変化

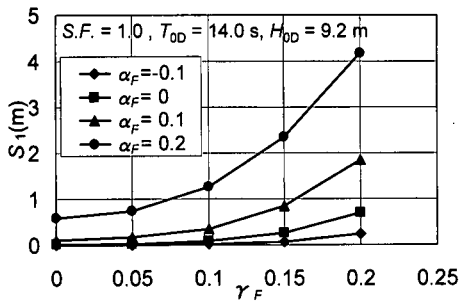


図-4 波力のばらつきと期待滑動量

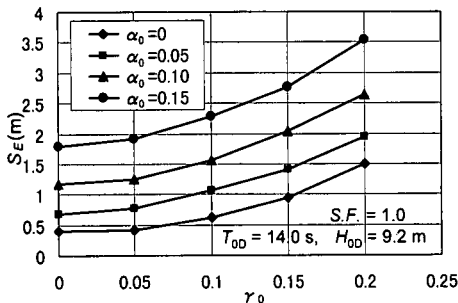


図-5 沖波のばらつきと期待滑動量

表-1 各種不確定要因の平均値の偏りと変動係数

不確定要因	平均値の偏り α	変動係数 γ	備考
沖波	0	0.1	
天文潮位	—	—	変動は考慮せず
高潮	0	0.1	
波浪変形	0	0.1	
有義波周期	0	0.1	
摩擦係数	0	0.1	
主波向き	—	—	$\pm 11.25^\circ$ で一様分布
波別周期	0	0.1	
波力	0	0.1	
自重	—	—	変動は考慮せず

を検討した。図-5は、横軸に変動係数 γ_0 をとり、縦軸には50年間（耐用期間）全体での期待滑動量 S_E をとって示したものである。波力の場合と比べると、相対的に γ_0 よりも α_0 の影響が大きい。これは、波力の変動は1波のみに影響を与えるのに対して、沖波の変動は1波群全体に影響を与えるので、平均値の偏りによる滑動量の変動が大きくなるためである。

d) その他の不確定要因

ここでは示していないが、a)～c)のほかに、波浪変形、摩擦係数、自重の変動などについても同様の検討を行った。表-1は、これらの検討結果に基づいて定めた、平均値の偏りおよび変動係数の値である。

4. 期待滑動量の計算結果

4.1 滑動安全率と期待滑動量

今回の計算例では、設計波を50年確率波とし、A: $H_{0D}=9.20$ m, $T_{0D}=14.0$ s, B: $H_{0D}=4.76$ m, $T_{0D}=10.1$ sの2種類の設計沖波を用いた。いずれも波形勾配 H_{0D}/L_{0D} は0.03である。設置水深 h は30 mから7.5 mまで変化させ、それぞれ、設計波に対する滑動安全率 $S.F.$ が1.2および1.0となるよう堤体幅を設定して検討を行った。ただし、これ以外の滑動安全率の場合についても一部検討を行っている。海底勾配は1/50とし、設計潮位はHWLで+2.0 mとしている。マウンド上水深 d については、HWL時において $d/h=0.65$ となるようマウンド高さを変化させた。また、天端高さ h_c については、HWL時において $h_c/H_{1/3}=0.6$ となるように設定した。

期待滑動量を実際の設計に用いるためには、まず現行設計法における滑動安全率と期待滑動量の関係を明らかにする必要がある。図-6は、設計沖波Aの条件に対して、種々の滑動安全率で設計した場合の50年間の期待滑動量 S_E を、水深別に示したものである。

同じ安全率であっても水深によって期待滑動量は異なっている。たとえば、 $S.F.=1.2$ の場合、 H_{0D}/h が0.5以上では滑動量は5 cm以下と非常に小さいが、 $H_{0D}/h=0.368$ では約26 cm、 $H_{0D}/h=0.307$ では約86 cmと大きい。これは、水深が浅いと波高の上限が砕波で規定され、あまり大きな滑動は生じないのに対し、水深が深い場合は、確率は低いものの、設計波を大きく上回る波が発生する可能性があることと、前回の報告（下迫ら、1997）で示したように、重複波の場合、砕波に比べて同じ安全率における1波での滑動量が大きいことが原因である。

なお、期待滑動量が比較的小さい場合、滑動安全率が多少変化しても、期待滑動量はそれほど大きく変化しない。したがって、各種不確定要因の変動特性の与え方に多少の誤差があっても、あまり大きな影響はない。これに対して、期待滑動量が多い場合には、変動特性の与え方による影響が非常に大きくなるので注意を要する。

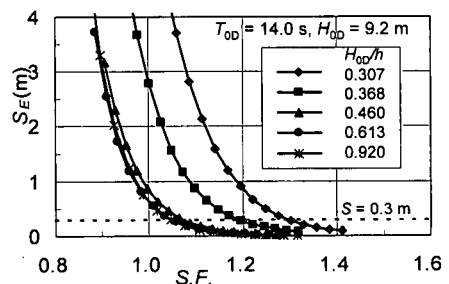


図-6 滑動安全率と期待滑動量

図-7は、滑動安全率1.0および1.2の断面について、水深 h と期待滑動量 S_E と関係を、2種類の設計沖波に対して示したものである。図-6でも述べたように、水深が設計沖波波高の2倍を超えると碎波の影響を受けなくなるため、期待滑動量が急激に増加する。ただし、設

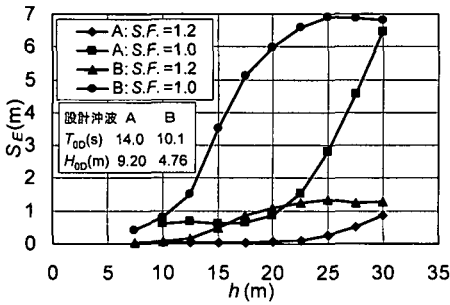


図-7 水深と期待滑動量

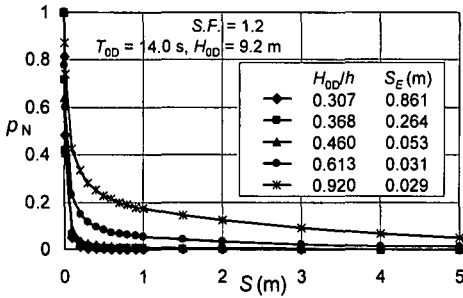


図-8 総滑動量の超過確率

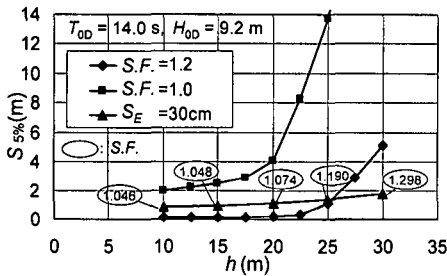


図-9 超過確率5%となる総滑動量

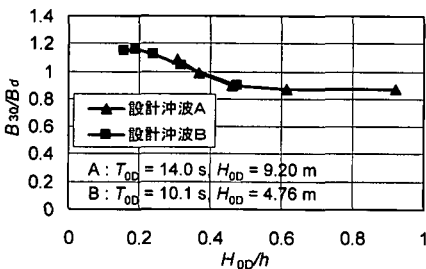


図-10 所要堤体幅の減少率

計沖波Bのケースからわかるように、水深がある程度以上深くなると、滑動量はほぼ一定となる。

4.2 総滑動量の超過確率

今回の計算では5000回の試行の平均値を期待滑動量と定義しており、各試行の中には当然ながらこれを上回る滑動量となったケースも含まれている。これは、実際の現象においても同様で、ある期待滑動量で設計した断面で、期待滑動量以上の滑動が生じる可能性は必ずある。したがって、平均値だけでなく、滑動量の頻度分布がどのようなかを検討する必要がある。

図-8は、設計沖波A、滑動安全率1.2の条件に対して、総滑動量の超過確率を水深別に示したものである。たとえば、水深 $h=20$ mの場合、期待滑動量 S_E は5.3 cmであるが、その約2倍および10倍の10 cmおよび50 cm以上滑動する確率はそれぞれ0.085, 0.016である。安全率が同じでも、水深によって期待滑動量が異なるため、超過確率も大きく異なっている。

図-9は、超過確率が5%となる滑動量 $S_{5\%}$ と水深 h の関係を表したものである。滑動安全率 $S.F.$ を1.0および1.2としたケースと、安全率に関係なく期待滑動量 S_E が30 cmとなるようにしたケースについて示しており、期待滑動量30 cmのケースについては、各点における滑動安全率の値も示している。滑動安全率を一定としたケースでは、期待滑動量の場合と同様に、水深が大きくなるにつれて滑動量も大きくなっている。これに対して、期待滑動量を一定にしたケースでは、水深が大きくなっても滑動量はそれほど大きく変化しない。すなわち、期待滑動量が一定となるように設計すると、水深に関係なくほぼ同じ安全性が確保できることを表している。

4.3 現行設計法との所要堤体幅の比較

図-6などからわかるように、期待滑動量が30 cmとなるように設計すると、現行設計法を用いて滑動安全率1.2となるよう設計した場合に比べて、多くの場合は断面が小さくなり、経済的となる。

図-10は、期待滑動量を30 cmとして設計した場合と現行設計法で設計した場合の所要堤体幅の比 B_{30}/B_d を示したもので、横軸には設計沖波波高と水深の比 H_{00}/h をとっている。 H_{00}/h が小さい場合、現行設計法よりも大きな断面となるが、 $H_{00}/h \geq 0.4$ であれば現行設計法よりも小さくなり、特に $H_{00}/h \geq 0.5$ のときは、1割以上小さな断面でよいことがわかる。

5. まとめ

5.1 新しい設計法の提案 (期待滑動量の許容値 S_{EA})

これまでの検討に基づき、期待滑動量を用いた新しい設計法を提案する。すなわち、通常の防波堤では期待滑動量の許容値 S_{EA} を30 cmとし、耐用期間中の滑動量が

それ以下となるように断面を設定する設計法である。すでに述べたように、期待滑動量が30 cm程度と小さい場合には、各種不確定要因の変動特性の誤差による滑動量の変化が小さく、多少の誤差は許容できる。この設計法を用いることにより、水深や波浪条件の違いに関係なく、常に同じ安全性を確保することが可能となる。

なお、防波堤の重要度や耐用期間に応じて許容値を変えることにより、さらに経済的な設計も可能である。ただし、大きく滑動した場合には復旧費用も考慮する必要がある、許容滑動量を大きくすることが、全体的に見て必ずしも経済的になるとは限らない。

5.2 今後の課題

a) 波向きの影響

現行設計法では、合田式による波力算定の際に、波向きを15°危険側へ補正する。たとえば、主波向き θ が30°の場合、波力算定に用いる波向き β は15°となる。図-11は、設計沖波A、水深 $h=20$ mに対して安全率1.2で設計した場合の期待滑動量 S_E を、波向き補正を行った場合と行わない場合とで比較したもので、横軸には補正前の主波向き θ をとっている。

補正ありでは、 θ が大きくなるにつれて期待滑動量は小さくなっている。これは、 θ が大きいくほど安全性が高いことを表しており、現行設計法における15°補正はやや過大であると考えられる。

一方、補正なしでは、 θ が大きくなるにつれて期待滑動量が大きくなっており、 $\theta=60^\circ$ では $\theta=0^\circ$ に比べて約5倍にもなっている。すなわち、現行設計法において15°補正を行わないと、同じ滑動安全率でも θ が大きいくほど安全性が低くなることを表している。

いずれにしても、今回提案した新設計法では、期待滑動量が一定となるように設計するので、波向きに関係なく同じ安全性が保たれることになる。

なお、今回の検討では、屈折および回折の影響を考慮していない。実際には、斜め入射の場合には、これらの影響によって、沖波の入射角のばらつきと堤体位置での入射角のばらつきは異なるため、さらに検討を要する。

b) 波力のばらつき

今回の検討においては、波力の変動について碎波と非碎波の区別なく一定としているが、実際には、非碎波のときの波力は、碎波のときに比べるとかなりばらつきが小さくなるため、水深の深い非碎波領域では期待滑動量が小さくなる可能性がある。したがって、合田式による波力を重複波成分と碎波成分に分離し、それぞれについてばらつきを与える方法が適切と考えられる。

c) 波高の平面的分布

防波堤の平面形状による堤頭部付近や隅角部などでは、局所的に波高が増大することがある。これについて

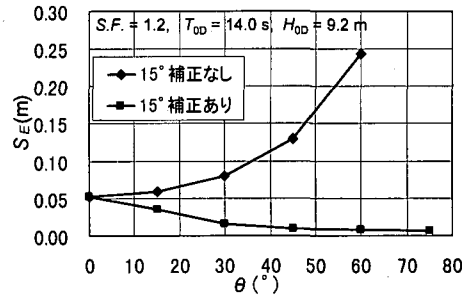


図-11 波向き補正と期待滑動量

は、多方向不規則波による検討も含めて、すでに多くの検討が行われている。期待滑動量を用いた設計においても、こうした影響を考慮し、局所的な被災を防ぐ必要がある。

d) 算定精度の向上

不確定要因の変動特性等について詳細に検討を進め、さらに期待滑動量の算定精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄 (1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港研報告, 第5巻第14号, 134 p.
- 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, 港研報告, 第36巻第4号, pp. 3-41.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 第12巻第3号, pp. 31-69.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 756-760.
- 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.
- 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.
- 高橋重雄・下迫健一郎・上部達生 (1994): 衝撃碎波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動, 港研報告, 第33巻第2号, pp. 59-86.
- 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, 港研報告, 第30巻第4号, pp. 35-64.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可 (1994): 防波堤の信頼性設計に向けて, 港湾技研資料, No. 785, 36 p.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 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.
- 外山進一 (1985): 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用, 港湾技研資料, No. 540, 49 p.
- 長尾 毅・門脇陽治・寺内 潔 (1995): 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第1報)～滑動安全性に関する検討～, 港研報告, 第34巻第1号, pp. 69-113.
- 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫 (1972): 高基混成堤直立部の期待滑動量について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 351-356.