

[討議・回答]

長尾 毅 著

「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」への討議・回答

(土木学会論文集, No.689/I-57 2001年10月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

中山隆弘 (広島工業大学)

Takahiro NAKAYAMA

近年、品質管理システム (ISO 9001) あるいは環境管理システム (ISO 14001) における国際化の潮流が構造設計の世界 (ISO 2394) にも及びつつある¹⁾。

そこでは、単に破壊の可能性が極めて小さい構造物を設計するためのみであれば有用であると言っても、構造物の安全性を論理的に説明するにはあいまいな指標と言わざるを得ない安全率の導入によって構造物の安全性を確保しようとする思想から、構造物の安全性のレベルを、相対的であるにせよ構造信頼性理論によって定量的に評価して、構造材料や構造形式によらない統一的な考え方の下で構造物を設計すべきであるという、設計思想上の大きな転換がある。

事実、本論文でも従来の設計法で設計された防波堤の波力に対する安全性のレベルにかなり大きなばらつきがあり、防波堤の耐波性能に対する品質保証の点から大きな問題があることが数値的に示されている。

著者の研究目的もその点の解消にあると言え、その点では本研究の意義は大きいと思われる。しかし、安全率 F の導入理由、精力的に収集された 76 例もの事例の活かし方、あるいは複数の破壊モード (滑動・転倒・支持力破壊) に対する目標安全性指標の考え方など、信頼性設計法に関心を持つ者として、関心と同時にいくつかの点に疑問を抱いた。

Q1. 安全率 F の意味について

許容応力度設計法における材料安全率とここでの安全率 F がまったく異なる性質のものであるとの認識は持っているつもりであるが、式 (1)~(3) で与えられた安全性照査式の中に F を持ち込むのはどのような理由によるのであろうか。換言すれば、この F は、防波堤のライフタイムリスク²⁾ に関わるどのような因子の不確実性を補うための安全率なのか。確率変数で扱っている設計因子以外、あるいはそれらにさえも含まれる、考えられる限りの諸因子の不確実性を補うための安全率なのか。討議者には、その点が良く理解できない。

言うまでもなくシステム安全性指標は構造物の絶対的な破壊確率と結びつくものではなく、安全性の相対的な水準を表す指標であるから、安全性照査式に安全

率を導入することは、信頼性設計法の本質を損なうことにはならないだろうか。

Q2. 波力の算定式について

波力の算定式と、それに含まれる不確実性が安全性指標の大きさに大きく関係するものと思われる。今回は、港湾施設の技術上の基準に従われたようであるが、例えば合田式のように他の波力式を用いた場合³⁾ にも、結論としている、「現行設計法による防波堤のシステム安全性指標の平均値は 2.4、標準偏差が 0.3」は成立するのか。手法はともかく、この数値を結論とするには、より慎重な検討が必要ではないか。

Q3. 既存防波堤の安全性指標のばらつきについて

安全率 F によって設計が行われてきたこれまでの多くの防波堤の安全性指標に極めて大きなばらつきがある (図-2) ようであるが、そのもっとも大きな原因はどこにあるのだろうか。信頼性設計に馴染みのない読者の新しい設計法の有用性に対する理解を得るためにも、この原因の分析は極めて重要であると考え。

Q4. 目標安全性指標について

著者は、「防波堤はどのような破壊モードが生じても基本的には原型復旧されることから、目標安全性指標を破壊モード毎に変えることは合理的ではない。」と考えておられるようである。しかし、破壊モードの重要性、この場合は原型復旧に要する期間や費用ということになるが、それによって目標安全性水準を変えるべきであるという考え方の方が、むしろ説得力を持つように思われるが、いかがであらうか。

Q5. 収集した事例の活用について

本研究では現行設計法による防波堤の外的安定水準を評価するために、地域のおよび設計条件的に偏りのない 76 例に及ぶ設計事例を広範囲にわたって収集し、前述のような貴重な成果を得られている。しかし、ライフサイクルコストを考慮した設計法をも視野に入れた場合、規模等の異なる防波堤をひとつの母集団と捉えるのではなく、規模や重要性等によってそれらをつくつかにグルーピングし、各グループ毎に目標安全性水準を設定すれば、より合理的な設計が可能になるの

ではないか。

Q6. 将来的見通しについて

今回、かなりの数に及ぶ既存防波堤の信頼性を Hasofer-Lind タイプの安全性指標によって評価し、また、別途、多数の信頼性設計も行っておられる。

設計用のプログラムを構築しておけば、今回検討の対象になっているレベル1の設計法によらずとも、それによって設計の実務でも現行設計法とほぼ同じ程度のロードでレベル2の方法での設計が可能ではないかという気がする。その可能性に対するご意見を伺いたい。

以上、今後、信頼性設計法等、構造種別によらない

統一的な構造物の安全性照査法を議論するための一助になればと私見を述べさせていただいた。ご回答をいただければ幸いである。

参考文献

- 1) 国際標準に基づく構造物の設計法，構造工学技術シリーズ No.18，土木学会，2000年8月。
- 2) 構造物のライフタイムリスクの評価，構造工学シリーズ 2，土木学会，1988年12月。
- 3) 中山隆弘，相田 清，今野光夫：防波堤の耐波信頼性評価への効率化シミュレーション法の適用性，構造工学論文集，Vol.37A，pp.585-592，1991年3月。

(2002.4.22 受付)

▶ 回答者 (Closure) _____ 長尾 毅 (国土技術政策総合研究所)
Takashi NAGAO

1. はじめに

原論文は、ケーソン式防波堤を対象に、ISO 2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) などの国際規格にも位置付けられた信頼性設計法の適用を検討したものである。信頼性設計法は構造物の破壊可能性を確率的に制御する方法で、レベル1からレベル3の3つのレベルの方法がある¹⁾。レベル数が大きくなるほど破壊可能性は正確に制御できるが、同時に設計計算は煩雑になる。上記 ISO 2394 の annex には、最も簡易なレベル1の信頼性設計法 (部分安全係数法) が位置付けられているが、これは設計実務への配慮も含まれていると考えられる。筆者としても、原論文に述べたとおり、レベル3の方法は設計実務への適用性は現時点では低いと判断し、レベル1およびレベル2設計法の適用法を検討した。

討議者からは、原論文に対する質問に加えて、信頼性設計法の設計実務への導入のあり方に関しても意見を求められており、討議への回答として筆者なりの見解を示してみたい。

2. 討議について

(1) 安全率 F の意味について

原論文式 (1)~式 (3) に示した安全性照査式は本文中に示したように現行設計法による照査式であり、許容応力度法による安全率と同様、設計過程に含まれている様々な不確定要因に対する余裕代であるといえる。また、討議者の指摘のとおり、信頼性設計法の安全性照査式に安全率を導入することは合理性が低いと筆者

も考えている。

このため、原論文のレベル1信頼性設計法における性能関数としては原論文式 (11)~式 (13) に示したように、現行設計法²⁾の安全率算定式 (原論文式 (1)~式 (3)) の右辺の分子を抵抗力 R 、分母を荷重効果 S と置くことによって性能関数 Z は $Z = R - S$ の形で定義しており、性能関数の中に安全率は含まれていない。ただし、支持力の安全性照査については、ビショップ法を採用しているために、 F を原論文式 (13) の中に残している。ここで、原論文式 (13) の F は不確定要因をカバーするための余裕代ではなく、ビショップ法の考え方に固有の比の値として用いている。ビショップ法では、発揮しうる最大せん断抵抗力と発揮しているせん断抵抗力の比を F_f と置き、さらに発揮しているせん断抵抗力に基づく抵抗モーメントとせん断モーメントの比についてもこれを F_f と置いて、両者を等値して収束計算するという方法を採用している。

本研究のテーマは信頼性設計法の導入であり、性能関数そのものの精査ではない。このため、原論文式 (13) では、ビショップ法の考え方をそのまま継承して安全性照査式を定式化している。すなわち、安全係数と特性値の積により得られる設計用値を用いて、発揮しうる最大せん断抵抗力の設計用値と発揮しているせん断抵抗力の設計用値の比と、発揮しているせん断抵抗力に基づく抵抗モーメントの設計用値とせん断モーメントの設計用値の比を等値して収束計算している。原論文式 (13) の F_f は、設計用値 (添字 d で表す) に関して R_d が S_d をちょうど上回ることを確認する際の補助パラメータとして用いていると理解されたい。

(2) 波力の算定式

原論文では、合田波力公式²⁾を用いて設計された防

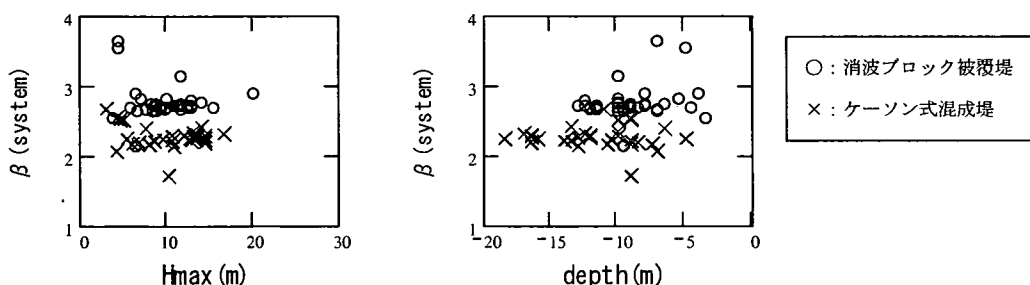


図-1 設計波高および水深とシステム安全性指標の関係

波堤の安全性水準を検討している。その際、合田波力公式の算定精度を考慮して安全性指標を算出している。この合田波力公式は、直立壁に作用する波力の算定方法として諸外国においても広く用いられている方法であり、我が国の港湾基準においても標準的な手法として用いることが求められている方法である。したがって、少なくとも現在我が国のケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤の設計は合田波力公式以外の手法を用いることは極めてまれであると考えられ、その意味で「現行設計法による」システム安全性指標は本研究に示した方法で適切に算定されたものと考えている。もちろんこれは、レア・ケースとして合田波力公式によらずに設計が行われる場合についてもシステム安全性指標の値が平均的に2.41であることを示すものではない。しかしながら、設計波高と設計断面が与えられていれば、合田式以外の方法で設計した防波堤断面の安全性指標を評価することは可能である。

(3) 既存防波堤の安全性指標のばらつきについて

本研究で扱った防波堤のシステム安全性指標のばらつきが比較的大きい理由は次のとおりである。

①原論文表-1に示したように、設計パラメータの従う確率分布が条件によって異なるものがある。具体的には波力算定に関係するパラメータのうちの波浪変形計算精度と波力算定式推定精度である。

このうち波力算定式推定精度については、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤でその安全性余裕度に違いがあり (α の値がケーソン式混成堤で0.91、消波ブロック被覆堤で0.84)、このことにより消波ブロック被覆堤はケーソン式混成堤よりも大きな安全性指標となることは原論文図-5に示したとおりである。なお、この安全性指標の違いは実際の被災事例からも確認されていることも原論文に記したとおりである。

次に波浪変形計算精度については、水深変化が急な場合は水深変化が緩やかな場合に比べて危険側の設定となる。原論文図-4におよび図-5における、各構造形式中での小さな安全性指標を示すケースは水深変化が急なケースに相当する。

それ以外のパラメータについては、安全性指標と明瞭な相関を持つものはない。代表的なパラメータとして設計波高 (H_{max})、ケーソン設置水深を例にとり、システム安全性指標との相関を図-1に示したが、相関性が低いことがわかる。

②システム安全性指標は、現行設計法で滑動・転倒・支持力破壊のそれぞれの破壊モードに対する許容安全率をちょうど満足する断面をもとに算出されている。このため、現行設計法の最終断面において滑動安全率は必ずしも許容値の1.2ではなく、他のモードを考慮したために1.3以上となるケースが存在する。システム安全性指標は滑動安全性指標との相関が高いため、そのようなケースでは、システム安全性指標は平均値よりも大きな値を示し、分布のばらつきの原因となる。原論文の図-2を参照することにより、このことは容易に理解できると考えられる。

(4) 目標安全性指標および収集した事例の活用について

Q4とQ5については、内容に関連性が高いことから、ここにまとめて回答する。

討議者ご指摘の破壊モードの重要性について検討すると、本研究で扱った防波堤の場合には、破壊モードの違いにより防波堤の要求性能である港内の静穏度の損失程度に大きな差が生じるわけではない。厳密には程度の違いは予想されるが、原論文に記したように、どのような破壊モードが生じても原型復旧される事実も、基本的にモードの違いによる要求性能の損失程度に差を認めていないことを意味する。さらに、現行設計法においては、防波堤の設計時に重要度は考慮していない。このことは、防波堤の目標安全性を施設の重要性や被災時の影響度合いなどに応じてランク分けしていないことを意味する。

したがって、現行設計法において用いられている安全率を用いた設計法を、平均的な安全性水準を保ったまま信頼性設計法に書き換えるという原論文の目的範囲内では、原論文で検討したように目標安全性水準をただひとつ定めることとなる。

目標安全性水準の違いを設けるとすれば、それはラ

ライフサイクルコストを考慮した際にライフサイクルコストが最小となる安全性水準が設計条件により大きく異なる場合になると考えられる。その場合は、現行設計法の安全性水準をキャリブレーションの対象とするという原論文の研究範囲外の考え方として、ライフサイクルコストが最小となる安全性水準が目標水準として妥当であるという、新たな考え方を導入することになる。ライフサイクルコスト最小化の考え方を導入した場合、目標となる安全性水準は現行設計法の安全性水準と必ずしも同水準とはならないことは言うまでもない。筆者もある1つの断面を対象に防波堤のライフサイクルコストを検討している³⁾が、より包括的にライフサイクルコストを考慮した目標安全性水準の設定について現在検討中である。ライフサイクルコストを考慮した結果については稿を改めて議論することとしたい。

(5) 将来的見通しについて

現在、港湾基準については信頼性設計法を全面的に導入すべく検討を開始したところであるが、2005年度末に改訂を予定している次期港湾基準においては、レベル2信頼性設計法ではなく、レベル1信頼性設計法を標準的な方法として位置づけることとしている⁴⁾。

ただし、レベル2信頼設計法のプログラムを用意しておけば、レベル1の方法によらずとも、より合理的なレベル2の方法で設計が可能であるという点は、討議者のご指摘のとおりと考えられる。それにもかかわらずレベル1信頼性設計法を標準的と想定しているのは、次のような理由からである。

まず第一に、次期港湾基準では性能規定型の設計法体系を構築することを目指している。その際、基準として強制されるものは要求性能を何らかの方法で達成することであり、達成方法の具体的な内容が強制されるわけではない。しかしながら、基準の参考図書に手法を一切示さないことは設計者の便を考慮すると適切ではないと考えられる。このため、すべての設計者が最低限度適用する方法としてレベル1信頼性設計法による方法を参考資料として位置付ける予定としている。もちろん、レベル1の信頼性設計法の適用は強制ではなく、レベル2以上の方法を用いることには何らの制

限もない。

このほかの理由としては、すべての構造設計にレベル2の方法の算定プログラムを用意するまでの準備が整っていないと考えられること、および、ISO 2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) においてもレベル1信頼性設計法が位置づけられ、Eurocodeなども同様な動きが認められることに加えて、レベル1信頼性設計法においては、計算プログラムを用いずとも設計が可能である点があげられる。

もちろん、以上述べたことはレベル2の方法を排除するという意味ではなく、設計者の判断に応じて、原論文で対象とした防波堤の外的安定問題などについては適宜レベル2以上の方法の適用が進むものと期待している。また、汎用的なプログラムが開発された際は、これを積極的に公開してその利用を促すことも重要なことであると考えている。

3. おわりに

本稿では、ケーソン式防波堤の外的安定問題に信頼性設計法を適用する際の討議者からの質問に答える形で、信頼性設計法の設計実務への適用についても見解を述べさせていただいた。性能設計の導入が進む中で、信頼性設計法の適用の具体的な方法に関する議論が今後各方面で進むものと考えられる。今回の討議を通じて、今後さらに設計法の構築に向けた議論が深まることが期待される。このような機会を与えていただいた討議者に感謝して討議の回答を終えたい。

参考文献

- 1) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 2) 運輸省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 3) 長尾 毅: 破壊確率を考慮した防波堤の期待総費用最小化に関する研究, 第4回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCROSSAR2000) 論文集, pp.441-448, 2000.
- 4) 長尾 毅: 港湾構造物の技術基準の改訂動向, 第5回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.9-20, 2002.

(2002.10.28 受付)